

Untersuchungen zur Eignung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Franz Wilhelm Wirth
geboren am 05.01.1987
aus Limburg an der Lahn

Eingereicht am:
28.01.2020
Disputation am:
15.06.2020

Berichterstatter:
Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Prof. Dr.-Ing. Asko Fromm

(2020)

ISBN: 978-3-00-066026-9

Braunschweig, Juni 2020

Kurzfassung

Untersuchungen zur Eignung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Durch den Einsatz von Robotern wurden viele Industriezweige unter anderem im Maschinen- und Automobilbau in den vergangenen Jahrzehnten automatisiert. Hierdurch konnten sie nicht nur ihre Wertschöpfungskette weiterentwickeln, sondern auch ihre Produktivität steigern. Besonders die Automobilindustrie, in der robotergestützte und autonome Serienfertigung von Fahrzeugen vorherrscht, zeigt dabei eindrucksvoll, wie immer höhere Stückzahlen in hoher Qualität bei gleichzeitig sinkenden Produktionskosten realisiert werden können. Im Bauwesen hingegen ist die Automatisierung bisher noch kaum angekommen und speziell im Betonbau herrscht heutzutage immer noch eine Vielzahl von manuellen Herstellungsprozessen vor.

Zwar existieren heute bereits Ansätze zur automatisierten Herstellung von standardisierten Betonfertigteilen, jedoch erfüllen diese kaum den Wunsch nach individuell geformten Bauwerksstrukturen, die besonders im Wohnungsbau vorherrschen. Im Vergleich zur Automobilindustrie, in der hohe gleichbleibende Stückzahlen gefertigt werden, sind Bauaufgaben meist individueller und die Stückzahlen gering. Der Umstand, dass sich Automatisierungen bisher nur über große Stückzahlen amortisieren, kann somit als Hemmnis dafür angesehen werden, dass sich die Automatisierung von Prozessen im Betonbau bei der Herstellung von freigeformten individuellen Betonbauteilen bisher nicht wirtschaftlich darstellen lässt. Um eine Automatisierung im Betonbau wirtschaftlich umzusetzen, fehlt es an neuen innovativen automatisierten Herstellungsprozessen für Betonfertigteile, mit denen sich auch Kleinserien und Unikate wirtschaftlich schalen und somit herstellen lassen.

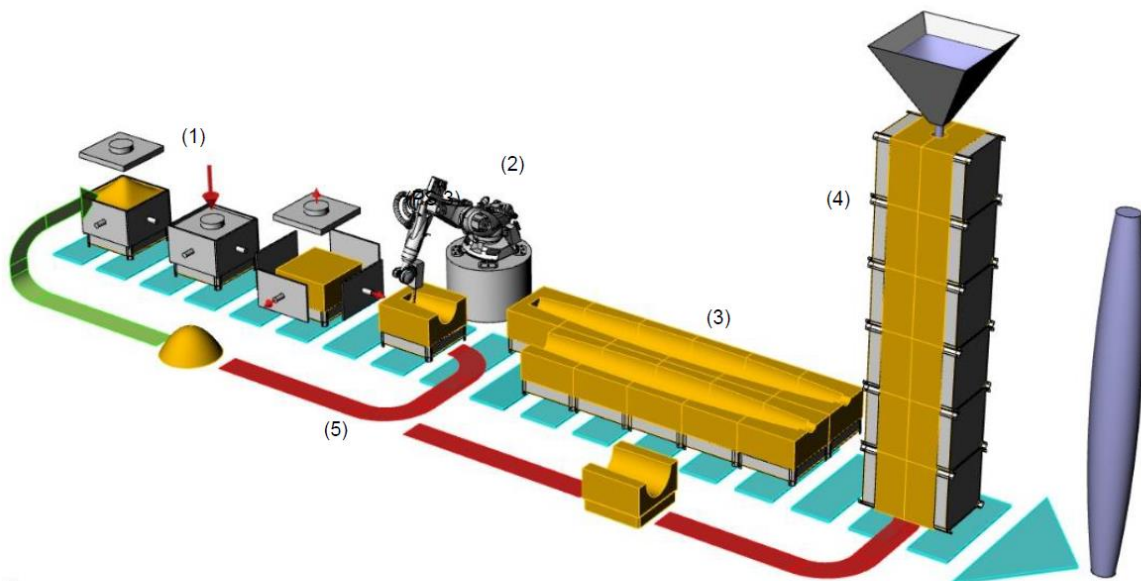


Abbildung 0-1: Schematische Darstellung des vollautomatisierten Fertigungsverfahrens für modulare Wachsschalung: (1) Pressen der Wachspäne zu Blöcken auf eine Stahlverbindingseinheit, (2) CNC-Fräsbearbeitung der Form und Herstellung der Negativschalung der Zielgeometrie, (3) Zusammenbau der einzelnen modularen Schalungseinheiten zu einer Gesamtschalung, (4) Betonage der Wachs-Schalung, (5) Recyclingprozess der benutzten Wachsschalungsmodule sowie der im Fräsprozess anfallenden Späne © ITE

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Es soll ein vollautomatisierter Fertigungsprozess entwickelt werden, mit dem freigeformte Betonbauteile abfallfrei hergestellt werden können. Hierzu wird Wachs als vollkommen recycelbares Schalungsmaterial zu Wachskörpern (Rohlingen) gepresst, die anschließend durch maschinelle Fräsbearbeitung zu freigeformten Schalungsmodulen geformt werden. Die so entstehenden Wachsschalungsmodule können im Anschluss aufgrund ihrer Modularität zu einer beliebig großen Gesamtschalung zusammengesetzt und mit Beton befüllt werden. Nach dem Erhärtungsprozess des Betons werden die nun nicht mehr benötigten Wachsschalungsmodule sowie

die im Fräsprozess anfallenden Wachsspäne durch einen ebenfalls zu erforschenden Recyclingprozess in den Fertigungsprozess zurückgeführt (Abbildung 0-1).

Durch die Erforschung dieses Fertigungsprozesses wird der Bauindustrie ein Herstellungsverfahren bereitgestellt, mit dem individuelle und in Serie produzierte Betonbauteilunikate kostengünstig hergestellt werden können. Neben der Vermeidung von Abfall können dabei durch die Wiederverwendung des Wachses die derzeit vorherrschenden hohen Herstellkosten von Schalungen für Unikate und Kleinserien gesenkt und der Einsatz solcher Betonbauteilunikate in der Bauwirtschaft auch unter wirtschaftlichen Aspekten realisiert werden.

Schlagworte: Wachs; Beton; Ressourceneffizienz; Leichtbau; vollautomatische Fertigungstechnik; Roboter; Präzision; Freiform; Recycling; Ultra Hochfester Beton UHPC; Leichtbeton;

Abstract

Research on the suitability of non-waste wax-formwork technology for the automatic, individual production of concrete structures

In recent decades, the use of robots has automated many branches of industry, including mechanical and automotive engineering. Consequently, these industries have been able to further develop their value-added chain while significantly increasing productivity. The automotive industry, in particular, dominated by the largely autonomous, robot-supported series production of vehicles, is an impressive example of how ever-increasing quantities of high-quality automobiles can be produced while production costs continue to decrease. In the building industry, however, automation is scarce, especially in concrete construction, where a multitude of manual production processes still prevail.

Current methods for the automated production of standardized precast-concrete elements do not meet the demand for individually shaped building structures, which are particularly prevalent in residential construction. Production of specialized construction materials is much less common compared to the continuous, large-scale production seen in the automotive industry. So far, automation has only proven cost effective for mass production, and it can be seen as a barrier to the low-cost construction of individual free-formed concrete components. A need exists in the construction industry for innovative automated processes with which unique, precast concrete parts can be economically formed and manufactured in small series.

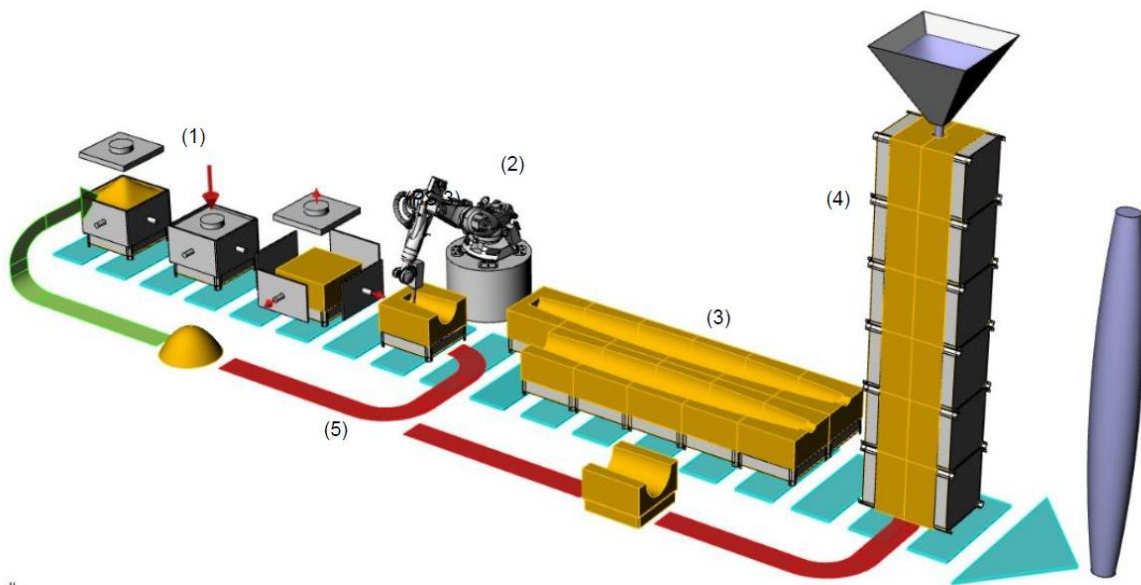


Abbildung 0-1: Schematic illustration of the fully automated production process for a modular wax formwork, which includes the following steps: (1) pressing of the wax chips into blocks on a steel connecting unit, (2) CNC milling of the form and production of the negative formwork of the target geometry, (3) assembly of the individual modular formwork units to form a complete formwork, (4) concreting of the wax formwork, and (5) recycling of the used wax formwork modules and chips resulting from the milling process © ITE

This need represents the starting point of the present study. A fully automated production process is to be developed for the waste-free manufacture of free-formed concrete components. For this purpose, wax - a completely recyclable formwork material - is pressed to wax bodies called blanks, which are then shaped into free-formed formwork modules by mechanical milling. Due to their modularity, the resulting wax formwork modules can then be assembled into a complete formwork of any size and filled with concrete. After the concrete has hardened, the disposable wax formwork modules and the wax shavings resulting from the milling process are returned to the production process through a recycling process (Figure 0-1).

Researching this production process, along with the wax recycling process, will provide the construction industry with a cost-effective approach for manufacturing individual and mass-produced unique concrete components. In addition to avoiding waste, the reuse of wax can significantly reduce the prevailing high

costs of manufacturing unique formworks. The use of such unique concrete components in the construction industry can also be realized under economic aspects.

Keywords: Wax; Concrete; Resource efficiency; Lightweight construction; Fully automatic production technology; Robots; Precision; Freeform; Recycling; Ultra-high performance concrete; UHPC; Lightweight concrete;

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) der Technischen Universität Braunschweig. Hier bearbeitete ich unter anderem ein durch die AiF Projekt GmbH (Projektträger im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie) gefördertes Kooperationsforschungsvorhaben mit der Bezeichnung *Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen*. Dieses Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Kooperationsfirma B+S Engineering GmbH aus Rheine durchgeführt und bildet die Grundlage für diese Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft für sein Interesse und seine Unterstützung an dieser Arbeit. Der enge wissenschaftliche Austausch, viele Anregungen und das entgegengebrachte Vertrauen trugen maßgeblich zur Fertigstellung dieser Arbeit während meiner Zeit am Institut bei.

In diesem Zusammenhang danke ich auch der AiF Projekt GmbH sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung des Forschungsvorhabens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Asko Fromm danke ich herzlichst für die Anfertigung des Zweitberichtes, für die vielen Anregungen und das ständige Interesse an meiner Arbeit. Mein Dank gilt auch Jun.-Prof. Dr. Norman Hack für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Frau Prof. Dr. Laura De Lorenzis und im Besonderen ihrem wissenschaftlichen Mitarbeiter Herrn Dr. Roland Krause und ihrem Techniker Herrn Thomas Buchheim danke ich für die Unterstützung und die Möglichkeit, Druckfestigkeitsuntersuchungen sowie Oberflächenhärteuntersuchungen durchführen zu können.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch und im Besondern Herrn Dr.-Ing. Marcus Petz danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung von optischer 3D-Vermessung von Kleinproben.

Herrn Peter Czajka und seinem Team von der GOM GmbH Braunschweig danke ich herzlich für die Unterstützung mit ihrer optischen 3D-Messtechnik bezüglich der Vermessung der Demonstratoren.

Ich danke dem Institut für Pharmazeutische Technologie für die Nutzung des Leica DMLM Lichtmikroskops.

Dem Kooperationspartner der B+S Engineering GmbH, Herrn Stephan Sehliger, und dem ganzen Team danke ich für die sehr gute, zielführende und praxisnahe Zusammenarbeit während der gesamten Projektlaufzeit.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Tragwerksentwurf bedanke ich mich für ihre Unterstützung, die kollegiale Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Im Besonderen gilt mein Dank Simon Schröter und Paul Boulmont, die mich bei etlichen Versuchen tatkräftig unterstützt haben sowie Herrn Dr.-Ing. Jeldrik Mainka, der mir immer mit Rat und Tat bei Fragen und Problemen zur Seite stand und welcher den Forschungsansatz zu dieser Arbeit erdacht hat.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden herzlich für deren Unterstützung in dieser Zeit danken. Im Besonderen möchte ich meiner Verlobten Julia Kröckel für Ihre Energie und Geduld sowie meinen Eltern Dipl.-Ing. Markus Wirth und Claudia Wirth für ihre ständige Unterstützung und Motivation zur Promotion danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Zielsetzung.....	3
1.3.1	Relevante ökonomische und ökologische Anforderungen	5
1.3.2	Relevante technische Anforderungen	6
1.4	Vorgehensweise/Inhaltsübersicht	8
2	Stand der Technik.....	9
2.1	Industrielle, serielle Fertigung von Betonbauteilen	9
2.1.1	Geschichtliche Entwicklung	9
2.1.2	Gängige Herstellungsverfahren für Betonfertigteile.....	16
2.1.2.1	Betonfertigteile im Hochbau.....	16
2.1.2.2	Betonfertigteile im Tiefbau	19
2.1.3	Gängige Herstellungsverfahren für individualisierte Betonbauteile.....	23
2.1.3.1	Hochbau	23
2.1.3.2	Tiefbau.....	25
2.2	Potenziale einer automatisierten und individuellen Fertigung	30
2.3	ConFormWax als Schalungsmaterial.....	36
2.4	Zusammenfassung	37
3	Definition der Prozessschritte der automatisierten Herstellung von individuellen Betonbauteilen	38
3.1	Konzept der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie	38
3.2	Herstellung von Wachrohrlingen	38
3.2.1	Möglichkeiten für die Herstellung von Schalungrohrlingen aus Wachs	38
3.2.2	Pressverfahren für Pulver, Späne und Granulat verschiedener Stoffe	39
3.2.3	Erkenntnisse aus den Pressverfahren für den zu entwickelnden Pressprozess..	44
3.3	Zerspanung von Wachrohrlingen	44
3.3.1	Geeignete Fräswerkzeuge.....	45
3.3.2	Fräsbahnplanung	48
3.4	Modularisierung einer Gesamtschalung	49
3.4.1	Herstellung von 1:1-Schalungen in Modulbauweise	51
3.4.2	Verbindungstechniken	53
3.4.3	Kombination von modularen Wachsschalungen und Systemschalungen.....	53

3.5	Betonage der Wachsschalungsmodule	54
3.6	Rezyklieren der Wachsrohlinge.....	58
3.6.1	Zerkleinern von Stoffen.....	58
3.6.2	Zielführende Mühlen und deren Eigenschaften.....	61
4	Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen	63
4.1	Eigenschaften des verwendeten Wachses.....	63
4.2	Die physikalischen Eigenschaften von ConFormWax für die automatisierte Fertigung..	64
4.2.1	Einfluss der Spangröße.....	67
4.2.1.1	Herstellung von Wachsspänen	67
4.2.1.2	Volumenkontraktion beim Pressen von Zylindern.....	68
4.2.1.3	Pressen von Wachsspänen in zwei Schichten	69
4.2.1.4	Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper.....	71
4.2.1.5	Zusammenfassung	72
4.2.2	Einfluss von Temperatur und Presskraft auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper	73
4.2.2.1	Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10 °C-50 °C, Presskraftbereich 10 kN-50 kN.....	74
4.2.2.2	Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35 °C-45 °C, Presskraftbereich 35 kN-55 kN.....	81
4.2.2.3	Versuchsreihe 3: Steigerung der Presskraft auf 100 kN.....	84
4.2.2.4	Zusammenfassung	84
4.2.3	Weiterführende Untersuchungen.....	85
4.2.3.1	Einfluss der Prüfkörpergeometrie	85
4.2.3.2	Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern.....	88
4.2.3.3	Zusatzstoffe im Wachs	90
4.2.3.4	Zusatzstoffe in flüssigem Wachs	94
4.2.3.5	Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper.....	96
4.2.3.6	Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper	99
4.2.3.7	Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit	103
4.2.3.8	Zusammenfassung	105
4.3	Einfluss der Pressparameter auf die Zerspanbarkeit von ConFormWax.....	106
4.3.1	Fräsgeometrie.....	107
4.3.2	Fräsparameter	107
4.3.3	Ergebnisse	108
4.3.3.1	Probekörper ohne Zusatzstoffe	108
4.3.3.2	Probekörper mit Zusatzstoffen.....	109
4.3.3.3	Optische Vermessung von gefrästen Wachsprüfkörpern.....	110
4.3.3.4	Werkzeugverschleiß bei der Zerspanung von Wachs mit Zusatzstoffen	111
4.3.4	Zusammenfassung	113

4.4	Geeignete Verbindungsmittel in ConFormWax	113
4.4.1	Nachträgliches Eindrehen von Verbindungsmitteln	114
4.4.2	Umpressen von Verbindungsmitteln	115
4.4.3	Verbindungen in Wachsprüfkörper (Herstellparameter: 40 °C und 50 kN)	116
4.4.4	Warme Verbindungsmittel eindrehen ohne Vorbohren	117
4.4.5	Vergleich der Auszugsfestigkeiten von Wachsprüfkörpern und großformatigen Wachrohrlingen	118
4.4.6	Zusammenfassung	120
4.5	Geeignete Trennmittel für ConFormWax	120
4.5.1	Grundsätzliche Eignung verschiedener Trennmittel	121
4.5.2	Einfluss der Abzeilabstände auf die Entschalbarkeit	123
4.5.3	Einfluss der Fräsbahnplanung auf die Entschalbarkeit	125
4.5.4	Zusammenfassung	126
4.6	Entwicklung eines Recyclingprozesses	127
4.6.1	Mahlversuche	127
4.6.2	Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs mit den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4	129
4.6.3	Mikroskop-Aufnahmen unterschiedlicher Wachsspäne	130
4.6.4	Zusammenfassung	131
5	Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele .	132
5.1	Herstellung einer freigeformten Stütze im Maßstab 1:3	132
5.1.1	Stützendesign	132
5.1.2	Fräsbahnplanung	132
5.1.3	Betonage und Vermessung	135
5.2	Herstellung eines Schachtsammlers	137
5.2.1	Herstellung der Schalung	137
5.2.2	Betonage und Herstellung des Betonkörpers	138
5.3	Herstellung einer freigeformten Stütze im Maßstab 1:1	140
5.3.1	Zusammenfügen einzelner Module zu einer Gesamtschalung	140
5.3.2	Herstellung des finalen Demonstrators	141
5.3.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Verfahrens	145
6	Zusammenfassung, Ausblick und Empfehlung	148
6.1	Zusammenfassung	148
6.2	Ausblick und Empfehlungen für weitere Anwendungen	150

7	Quellenverzeichnis	152
	7.1 Literatur	152
	7.2 Tabellenverzeichnis	158
	7.3 Abbildungsverzeichnis	158
8	Werdegang	165
9	Anhang.....	166

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen:

CAD	Computer Aided Design (rechnergestütztes Konstruieren und Zeichnen)
CAE	Computer Aided Engineering (rechnergestützte Entwicklung und Berechnungen)
CAM	Computer Aided Manufacturing (rechnergestützte Steuerung und Überwachung von Produktionsabläufen)
CFW	ConFormWax (Concrete Formwork Wax)
CNC	Computerized Numerical Control (rechnergestützte numerische Steuerung)
DBFL	Building Fabrication Laboratory Großgerät des ITE
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DSC	dynamische Differenzkalorimetrie
EPS	Expandiertes Polystyrol
EVAC	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer
FEM	Finite-Element-Methode
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH, Braunschweig
HD-PE	Polyethylen hoher Dichte (high density polyethylen)
ITE	Institut für Tragwerksentwurf der Technischen Universität Braunschweig
LD-PE	Polyethylen geringer Dichte (low density polyethylen)
PE	Polyethylen
PU/PUR	Polyurethan
SPP	Schwerpunktprogramm der DFG
SVE	Stahlverbindungseinheit
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
UHPC	Ultrahochfester Beton (ultra high performance concrete)
XPS	Extrudierter Polystyrol-Hartschaum

Lateinische Buchstaben:

a_e	Arbeitseingriff
a_p	Zustellung (Schnittbreite)
b	Breite allgemein
$d / D / \varnothing$	Durchmesser allgemein
d_1	Schneidendurchmesser
d_2	Schaftdurchmesser
E_{Wax}	E-Modul Wachs
F_0	Vorlast
F_m	Prüflast
f_{PL}	plastische Verformung
f_z	Vorschub je Schneide
F_Z	Auszugskraft
h	Höhe allgemein
H	Schalungshöhe
HB	Kugeleindringhärte
h_1	Eindringtiefe
h_E	Betonierhöhe
h_r	reduzierte Prüflast
h_s	hydrostatische Druckhöhe
$h_{Wölbung}$	Höhe der Wölbung
l	Länge allgemein

l_1	Werkzeuglänge
l_2	Schneidennlänge
n	Drehzahl
P	Poisonzahl
Q	Zeitspanvolumen
r_w	Wölbungsradius
S	Steigung der Entlastungskurve
T	Temperatur
T_M	Schmelztemperatur
T_G	Glasübergangstemperatur
T_Z	Zersetzungstemperatur
t	Zeit
t_E	Erstarrungsende
U	maximale Eindringtiefe der Kugel
v	Steiggeschwindigkeit
v_c	Schnittgeschwindigkeit
v_f	Vorschubgeschwindigkeit
z	Schneidenanzahl

Griechische Buchstaben:

γ	Neigungswinkel
γ_c	Wichte von Beton
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert laut DIN EN 12812
σ_{hk}	Auf die Schalung wirkender charakteristischer Frischbetondruck
σ_{hd}	Auf die Schalung wirkender Frischbetondruck
λ	Drallwinkel

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Digitalisierung und Automatisierung ist in vielen Bereichen auf dem Vormarsch oder hat schon Einzug in z. B. die Automobilindustrie gehalten. Durch eine stetige Weiterentwicklung von Prozessen ist es in der automatisierten Fertigung derzeit möglich, die gesamte Wertschöpfungskette von der Warenbeschaffung über die Produktion hin zur Qualitätssicherung zu vernetzen und digital abzubilden. Die Bezeichnung *Industrie 4.0* oder *Smart Factory* beschreibt diesen Ansatz der Vernetzung aller Teilprozesse. Im Gegensatz dazu sind in der Bauwirtschaft nur wenige digitale Prozesse komplett implementiert. Lediglich in wenigen Bereichen wie etwa der Entwurf- und Tragwerksplanung sowie der Konstruktion hat die Digitalisierung in Bauplanungsbüros in Form von leistungsfähigen Softwareprogrammen Einzug gehalten. Jedoch werden auf der Baustelle nur wenige Prozesse digital abgewickelt. Vor Ort werden heutzutage immer hochwertigere Baustoffe und industriell hergestellte Halbzeuge dem Prinzip *Stein-auf-Stein* folgend aufeinandergesetzt. Durch diese händische Ausführungsweise ergeben sich Nachteile wie Qualitätseinbußen und kostenintensive Arbeitsprozesse im Vergleich zur maschinellen Herstellung von Bauteilen. Nach [1] kommt ein Arbeiter lediglich rund 30 % seiner Arbeitszeit seiner Haupttätigkeit nach. Die restlichen 70 % werden auf Wegen, Transportarbeiten, Auf- und Umräumarbeiten sowie mit dem Suchen von Materialien und Werkzeugen verschwendet. Die Diskrepanz zwischen dem, was in der digitalen Planungswelt an Komplexität handhabbar ist und was in der realen Welt baulich umgesetzt wird, hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. War die Motivation zu freieren architektonischen Formen im Bauwesen Anfang des 21. Jahrhunderts noch auf den individuellen Gestaltungswillen einzelner Architekten zurückzuführen (Bilbao-Effekt), ist eine gesteigerte Bauteilperformance durch das Zusammenwirken von äußerer Form und innerem Materialaufbau die grundlegende Voraussetzung für die Umsetzung einer ressourcen-effizienten Bauwirtschaft. Die Entwicklung bezüglich des Energieverbrauchs heutiger Gebäude hin zu Null- und Plusenergiehäusern ist auf die Anlagentechnik und die hoch-wärmedämmende Außenhülle zurückzuführen. Äußerlich und strukturell betrachtet bauen wir jedoch nach wie vor *Kisten* aus Stein und Beton und die Effizienz und Leistungsfähigkeit der konstruktiven Bauteile bleiben in der energetischen Bilanzierung bisher unberücksichtigt.

Beton ist nach Wasser der meistverwendete Stoff weltweit. Gleichzeitig steigen gerade in den letzten Jahren einhergehend mit der zunehmenden Anforderung an die architektonische Gestaltung die Leistungsfähigkeit der Tragwerke, die Lebensdauer der Bauwerke sowie die Anforderungen an diesen bewährten Baustoff. In Deutschland werden die meisten Gebäude in der sogenannten *Massivbauweise* errichtet. Der Werkstoff Beton nimmt hier eine zentrale Funktion ein. Trotz seiner hervorragenden Formbarkeit im flüssigen Zustand tritt er heutzutage vor allem in Form orthogonal-planar geformter Bauteile in Erscheinung. Dies ist hauptsächlich auf einen Entwicklungsrückstand im Bereich der Betonschalungssysteme zurückzuführen. Mithilfe entsprechender Softwarelösungen ist es zwar möglich, frei geformte, optimierte Bauteile am Rechner zu modellieren und zu berechnen, für deren Herstellung werden aber technisch aufwändige und somit teure Sonderschalungen aus Holz und Kunststoffen benötigt. Hier stoßen die Interessen von Bauherren, Architekten und Ingenieuren mit den technisch eingeschränkten Möglichkeiten der Bauunternehmen zusammen. Bauherren, Architekten und Ingenieure möchten individuell geformte Betonteile wie formoptimierte Stützen in ihren Bauten verwenden, um durch Betoneinsparung die Wirtschaftlichkeit der Konstruktionen zu erhöhen, und benötigen daher Schalungssysteme für diese Bauteile zu attraktiven Konditionen. Bauausführende Unternehmen können dies heute aufgrund fehlender kosteneffizienter Schalungstechniken für frei geformte Bauteile nicht leisten, weswegen, bis auf vereinzelte Prestigebauwerke, auf orthogonal-planare Standardschalungen zurückgegriffen wird. Durch die Rektangularisierung der statisch notwendigen Optimalform wird mehr Beton als nötig verbaut. In manchen Fällen werden Mehrkosten für Sonderschalungen in Kauf genommen, weil dadurch nicht nur ästhetischere, sondern auch materialeffizientere und damit umweltfreundlichere Bauwerke möglich werden.

Die Tatsache, dass heutige Sonderschalungen meist *Einwegschalungen* und somit Deponiemüll sind, widerspricht jedoch dem gewünschten Nutzen und macht auch die Nachhaltigkeit im Sinne einer ökologischen Gesamtbetrachtung zunichte. Durch die jüngste Entwicklung praxistauglicher Hochleistungsbetone wie (Infra-)Leichtbetone mit einem verringerten Eigengewicht bei gleicher Festigkeit [2, 3], (ultra-)hochfeste Betone mit enormer Drucktragfähigkeit und Steifigkeit [4], dauerhafte, duktile Faserbetone oder fließfähige, selbstverdichtende Betone [5] wird das Bedürfnis nach individuell geformten Betonteilen weiter verstärkt. Durch die hohen Materialkosten der Hochleistungsbetone gegenüber Normalbeton spricht diese Tatsache gegen die gängige Ausführung materialintensiver orthogonal-planarer Bauteile.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass, selbst wenn der Wille besteht, heute mit Beton effizient und materialsparend zu bauen, dies zwar technisch möglich ist, aber unter Betrachtung des Gesamtherstellungsprozesses von Bauteilen weder wirtschaftlich noch ökologisch sinnvoll ist.

1.2 Problemstellung

Bei der Betrachtung des Herstellungsprozesses von Betonteilen ist festzustellen, dass zwar eine Rationalisierung als Konsequenz des zunehmenden Drangs der Wirtschaftlichkeit durch Wiederholbarkeit und Vereinfachung der Geometrien hin zu Quadraten und Rechtecken stattgefunden hat [6], diese aber im Gegenzug zum Einsatz statisch nicht notwendiger, *toter* Betonmengen führt. Im Betonbau kann daher bei ganzheitlicher Betrachtung eher von einer *rückwärtigen* Entwicklung weg von effizienten Formen und einem effizienten Einsatz von Beton gesprochen werden. Wenn es um die Herstellung von individuell frei geformten Betonbauteilen in kleinen Serien geht, erscheint die Betonindustrie mit ihren bestehenden Verfahren im Vergleich zu anderen Industriezweigen wie dem Maschinen- oder dem Automobilbau sogar veraltet. Dabei ist die Beherrschung dieser Schlüsseltechnologie, weg vom plumpen Betonbau der Vergangenheit hin zur Filigranität und Leichtigkeit des Betonbaus der Zukunft, von hoher gesamtgesellschaftlicher Bedeutung. Durch eine Reduktion des Eigengewichtes von Betonbauteilen und der damit einhergehenden Einsparung von grauer Energie (gebundener Energie) könnte vor allem mit der daraus resultierenden Reduktion des Zementverbrauchs das Bauwesen einen wichtigen Beitrag zur Verminderung des CO₂-Ausstoßes leisten. Derzeit erzeugt die Zementindustrie weltweit jährlich etwa zwei Milliarden Tonnen Kohlendioxid (6 % des jährlichen weltweiten CO₂-Ausstoßes) [7] und übertrifft damit sogar die Emissionen der Luftfahrt von ca. 670 Millionen Tonnen (2 % des jährlichen weltweiten CO₂-Ausstoßes) [8].

Aus den zuvor genannten Gründen wird am ITE seit 2014 an einer neuartigen Schalungstechnologie geforscht. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit sind in der Dissertation zum Thema *Non-Waste-Wachsschalungen* zusammengefasst. [9] In dieser Arbeit wird der Ansatz verfolgt, aus technischem Wachs Negativformen als Schalungen für den Betonbau mittels Zerspanung herzustellen. Durch Einschmelzen des Wachses können nicht mehr benötigte Schalungselemente in den Recycling-Kreislauf zurückgeführt werden. Durch das Einschmelzen des Wachses kommt dieses Verfahren ohne die Produktion von Abfall aus (Zero Waste). In Abbildung 1-1 wird die gesamte Prozesskette dieses Verfahrens schematisch dargestellt.

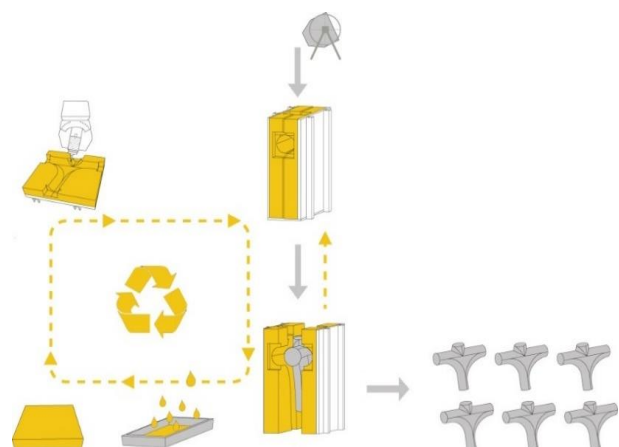


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung der Prozesskette für freigeformte Betonbauteile auf Basis von technischen Wachsen [9] © ITE

Heißes, flüssiges Wachs wird in eine Form gegossen. Nach dem Abkühlen werden aus dem Wachs die Negativformen des später herzustellenden Betonbauteils mittels Zerspanung herausgefräst. Nach dem Zerspanungsprozess werden die einzelnen Wachsschalungskörper zu einer Gesamtschalung zusammengesetzt und ausbetoniert. Nach dem Erhärtungsprozess des Betons wird die Wachsschalung vom Betonkörper getrennt und durch Einschmelzen in den Prozesskreislauf zurückgeführt.

Diese Arbeit bezieht sich auf die Grundlagenuntersuchungen von unterschiedlichen Wachsen und deren grundsätzliche Tauglichkeit für die Verwendung als Schalungsmaterial für Freiformbetonbauteile. Weiter wurden auch einige Versuche zur Herstellung von großformatigen Betonbauteilen untersucht. Hierbei wurden Probleme deutlich, die die Skalierung dieser Forschungsergebnisse auf einen automatisierten und individuellen Fertigungsprozess für die Herstellung großformatiger Betonbauteile unmöglich machen. Wachs besitzt die Eigenschaft, sein Volumen vom festen zum flüssigen Aggregatzustand zu vergrößern (temperaturabhängige Volumenänderung). Das hat zur Folge, dass sich großformatige Wachsböcke während des Abkühlprozesses zusammenziehen, Risse bilden und dadurch innere Spannungen im Material zurückbleiben, die im darauffolgenden Zerspanungs- sowie Betonierprozess als hinderlich zu betrachten sind. Auch die in der Arbeit als bestmögliche Alternative für die Herstellung großformatiger, spannungsarmer Wachsböcke beschriebene Methode, kalte Wachstafeln mit heißem, flüssigem Wachs zu vergießen, stellt hinsichtlich der beiden zuvor genannten Nachteile zwar eine deutliche Verbesserung dar, jedoch bleiben zwei weitere Nachteile vorhanden. Die Abkühlzeit eines Wachsböcks der Größe 500/500/150mm auf Raumtemperatur beträgt ca. drei Stunden. Zusammen mit der benötigten Energiemenge zum Schmelzen von Wachs beeinflussen diese beiden Eigenschaften die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses negativ.

Die Grundlagenuntersuchungen am ITE zum Thema *Non-Waste-Wachsschalungen* haben zudem ergeben, dass sich das Wachs mit dem Name ConFormWax® (Concrete-Formwork-Wax, kurz CFW) [10] als zielführend für den Einsatz in einer automatisierten Fertigung für individuelle Betonbauteile erwiesen hat.

1.3 Zielsetzung

Diese Arbeit basiert auf den Forschungsergebnissen des am ITE in Kooperation mit dem Industriepartner B+S Engineering GmbH aus Rheine [11] durchgeführten Forschungsvorhabens mit dem Titel *Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen*, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Zeitraum von April 2017 bis Februar 2019 gefördert wurde, und baut auf dem am ITE durchgeführten Grundlagenforschungsprojekt von Mainka mit dem Titel *Non-Waste-Wachsschalungen* auf.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie zu einem automatisierten und individuellen Herstellungsverfahren für großformatige Betonbauteile weiterzuentwickeln. Um im Vergleich zu am Markt vorhandenen Schalungssystemen einen Vorteil zu erhalten, muss ein Verfahren sowohl ökonomisch als auch ökologisch nachhaltig sein. Gleichzeitig soll eine hohe Präzision bei zugleich hoher Formenfreiheit der herzustellenden Betonbauteile gewährleistet werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Herstellungsverfahren von individuellen und freigeformten Betonbauteilen über die gesamte Wertschöpfungskette vom Entwurf über die Produktion und die Qualitätskontrolle bis zum *Closed-loop*-Recyclingprozess digital abbildbar sein. Durch die Verwendung von maschinell gefrästem CFW als recyclebares Schalungsmaterial kommt das Verfahren nicht nur ohne Produktionsabfälle aus (Zero Waste), sondern bietet durch die kosteneffiziente, vollautomatisierte maschinelle Zerspanung eine wirtschaftliche Alternative zu den bestehenden, teilmanuell gefertigten Einwegschalungen.

Dieses neuartige Herstellungsverfahren soll in Zukunft der Bauindustrie eine modulare Schalungstechnik zur Verfügung stellen, mit der nahezu jede denkbare Geometrie von Stützen, Wänden, Decken, Schalen etc. in Beton nachhaltig und effizient hergestellt werden kann. Da sich im

geplanten automatisierten Prozess die Arbeitsschritte wiederholen, hat die geometrische Komplexität der individuellen Schalungseinkate keinen Einfluss mehr auf den Prozess an sich, sondern nur noch auf die Fräsdauer. In Analogie zum automatisierten Fahrzeugbau können so durch die Beherrschung des Gesamtprozesses Kosten und Risiken gegenüber der individuellen teilmanuellen Fertigung reduziert werden. Die derzeit herrschende Abhängigkeit zwischen Wirtschaftlichkeit, Stückzahl und Regelmäßigkeit von Betonbauteilen wird durch diesen automatisierten Herstellungsprozess aufgehoben. Der in dieser Arbeit beschriebene Herstellungsprozess ermöglicht eine individuelle Fertigung von Bauteilen als Einzelstücke, die jedoch in Serie automatisiert produziert werden. Die im Prozess produzierten Wachs-Schalungsmodule und die daraus entstehenden freigeformten Betonbauteile werden zu *seriellen Unikaten*.

Abbildung 1-2 verdeutlicht die technische Funktionalität des geplanten neuartigen Herstellungsverfahrens und die damit mögliche Anwendungsvielfalt im Betonbau am Beispiel von schlanken und hoch effektiven Schalenstützen in Anlehnung an den neuen Hauptbahnhof in Stuttgart.

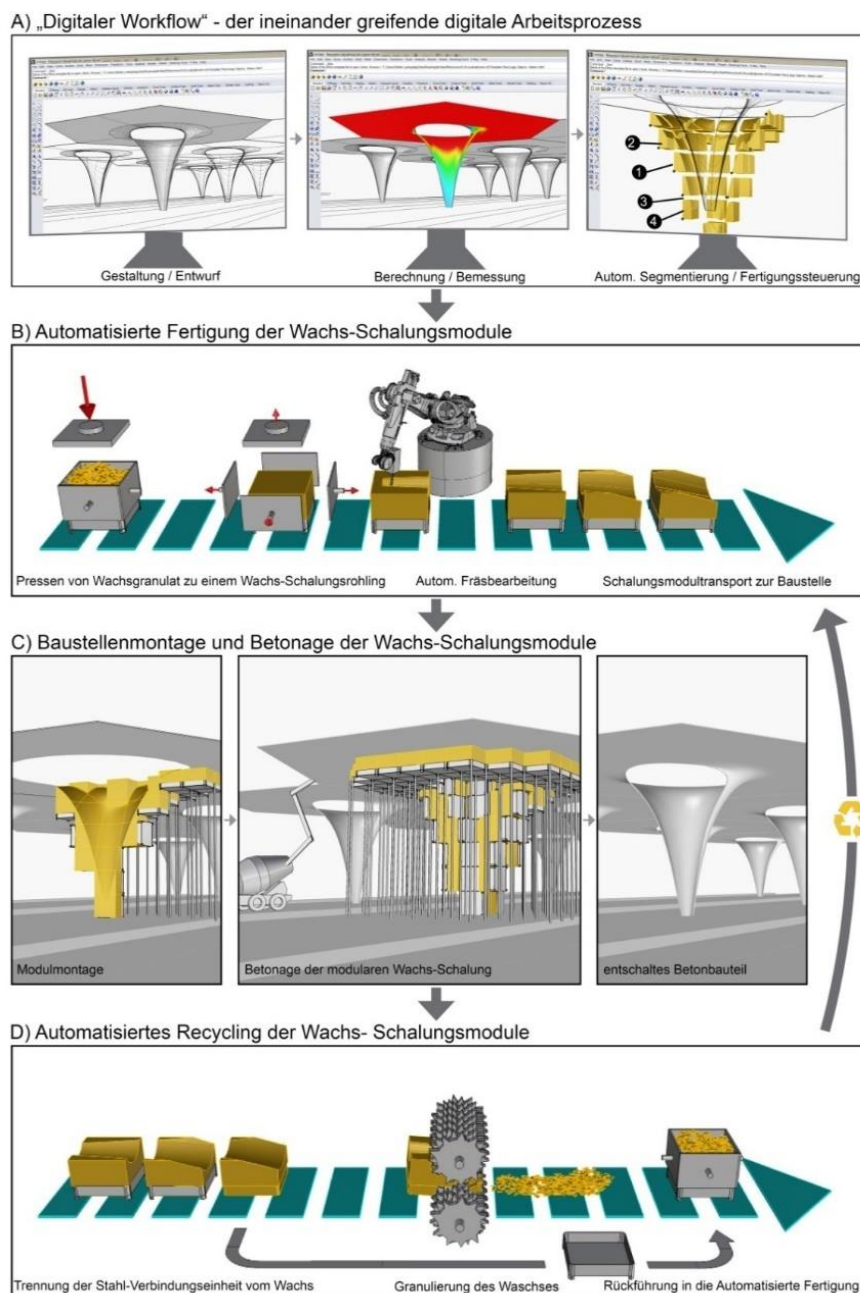


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung des vollautomatisierten Herstellungsverfahrens für freigeformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von recycelbarem CFW am Beispiel der Betonierung frei geformter Stützen © ITE

A) Digitaler Workflow – die ineinandergreifenden digitalen Arbeitsprozesse

Wie bereits in der Baupraxis üblich, wird durch den Architekten das gewünschte Betonbauteil am Rechner in 3D entworfen (CAD) und als digitales Volumenmodell an den Ingenieur übergeben. Dieser berechnet, optimiert und bemisst das Modell mit leistungsstarken Finite-Elemente-Programmen (CAE) und erzeugt so die individuelle und effiziente Bauteilgeometrie für die Herstellung in Beton. Durch die Software wird im Folgenden für diese Bauteilgeometrie automatisch eine passende Schalung erstellt und in einzelne Schalungsmodule segmentiert. Die daraus durch die Software errechneten modulweisen Fertigungsdaten werden zusammen mit der Nummerierung sowie der späteren räumlichen Position des Moduls an die automatisierte Fertigung übergeben.

B) Automatisierte Fertigung der Wachs-Schalungsmodule

Auf eine Stahlträgerplatte, die sogenannte Stahlverbindungseinheit (SVE), wird mithilfe einer Presse ein rechteckiger Wachsblock aus Wachsgrenulat/-spänen zusammengepresst. Der so entstehende Wachs-Schalungsrohling wird maschinell (z. B. mit Hilfe eines Roboters) auf Basis der Fertigungsdaten des jeweiligen Moduls durch Fräsbearbeitung zu einem individuellen Wachs-Schalungsmodul geformt. Zudem wird das Modul mit allen relevanten Daten für die Montage beschriftet und mit Vermessungsmarken versehen, die ein exaktes Ausrichten auf der Baustelle gemäß dem digitalen Modell erlauben. Der im Prozess entstehende Span (Fräsgut/Ausschuss) wird unmittelbar in den Pressvorgang zurückgeführt.

C) Montage der Wachs-Schalungsmodule zu einer Gesamtschalung und Betonage

Die individuell geformten Wachs-Schalungsmodule werden im Fertigteilwerk oder auf der Baustelle zu einer Gesamtschalung für das zu betonierende Bauteil zusammengesetzt. Hierbei werden die einzelnen Wachs-Schalungsmodule über ihre Stahlverbindungsmodule untereinander verbunden und ggfls. durch ein konventionelles Stahlraumgerüst unterstützt. Nach Zusammensetzen aller Module kann die Schalung konventionell bewehrt und ausbetoniert werden. Nach dem Ausschalen des fertigen Betonbauteils können die Wachs-Schalungsmodule nochmals für ein weiteres gleichgeformtes Bauteil verwendet oder dem automatisierten Recycling zugeführt werden.

D) Automatisiertes Recycling der Wachs-Schalungsmodule

Im automatisierten Recyclingprozess werden die standardisierten Stahlverbindungseinheiten vom Wachs getrennt. Nach der Entfernung von Verunreinigungen wird das Wachs zu Granulat/Spänen zerkleinert und abfallfrei wieder in die automatisierte Fertigung (B) zurückgeführt.

1.3.1 Relevante ökonomische und ökologische Anforderungen

Basierend auf der Analyse der auf dem Markt verfügbaren Konkurrenzprodukte von deutschen Schalungsherstellern für freie Formen mit Radien über 1,5 m müssen für einen wirtschaftlichen Einsatz die Herstellkosten einschließlich der Recyclingkosten der Non-Waste-Wachsschalung unter den Herstellkosten am Markt verfügbarer Freiformschalungssysteme liegen. Um das Verfahren zudem nicht nur gegenüber bestehenden Freiform-Schalungssystemen, sondern auch gegenüber bestehenden orthogonal-planaren Systemschalungen attraktiv zu machen, sollen die Herstellkosten zudem soweit wie möglich reduziert werden.

Die angestrebte **Recyclingquote von 99 %** des als Schalungsmaterial verwendeten Wachses begünstigt zudem das Verfahren gegenüber den Konkurrenzprodukten in zwei wesentlichen Punkten:

Durch die nachhaltige Ressourcennutzung des Wachses und eine nahezu völlige Vermeidung von Produktionsabfällen (Zero Waste) besitzt das Verfahren als *soften* ökologischen Faktor einen Imagevorteil gegenüber den bestehenden *Einwegschalungssystemen* für Freiformbetonbauteile.

Durch die mehrfache Wiederverwendung des Wachses und der Stahlverbindungseinheiten entstehen nahezu keine Verbrauchskosten für das eingesetzte Material. Lediglich die anfallenden Investitionskosten sind auf die Anzahl der erwarteten Nutzungszyklen umzulegen.

1.3.2 Relevante technische Anforderungen

Die im Folgenden aufgeführten relevanten technischen Parameter ergeben sich einerseits aus den ökonomischen Rahmenbedingungen der Fertigungsprozesse und andererseits aus den technischen Anforderungen an die mit den Schalungen herzustellenden frei geformten Betonteile.

Taktzeit/Fertigungsfrequenz

Die Taktzeit/Fertigungsfrequenz des automatisierten Fertigungsprozesses der Wachs-Schalungsmodule (Abbildung 1-2, C) wird durch die Bearbeitungszeit des Wachs-Rohlings der Roboter bestimmt. Da diese im Fräsprozess stark von der zu erstellenden Geometrie abhängt und somit variiert, soll diese im Mittel für Geometrien mit Radien größer 1,5m unter 45min liegen.

Für das Pressen sowie Schreddern (Recyclingprozess) des Wachses wird dagegen nur von einer Bearbeitungszeit von jeweils unter 15min/Einheit ausgegangen.

Recyclingquote

Zur Vermeidung von Materialkosten wird eine Rückgewinnungsquote des recycelten Wachses von 99 % angestrebt. Die Spangröße, die beim automatisierten Recycling der Wachs-Schalungsmodule durch das Zerkleinern des Wachses entsteht, wird im zu erforschenden Pressprozess in Abhängigkeit vom Pressdruck und der Presstemperatur abgestimmt.

Pressdruck/Presstemperatur

Wie zuvor beschrieben, werden Wachs-Schalungsrohlinge aus Wachsspänen auf die Stahlverbindungseinheiten aufgepresst. Hierfür muss durch Versuche ein zielführendes Verhältnis zwischen Pressdruck und Presstemperatur der Wachsspäne ermittelt werden, um Lufteinschlüsse (Lunker) und innere Spannungen im Wachsblock zu vermeiden. Als Ausgangspunkt für die Versuche werden die Rohlinge bei einem Druck von 4,45 N/mm² und mit einer Temperatur von 20 °C gepresst. Vorversuche am ITE haben gezeigt, dass die Presstechnik im Vergleich zum Guss von Blöcken aus flüssigem Wachs weniger Energie benötigt und aufgrund des Schwindverhaltens des Wachses bei der Abkühlung maßhaltigere Ergebnisse liefert.

Oberflächengenauigkeit von Wachsschalung und Betonbauteil

In Anlehnung an die Maximalforderungen der in der DIN 18202 [12] *Toleranzen im Hochbau* – Tabelle 3, Spalte 7 – geforderten Ebenheitstoleranz mit erhöhten Anforderungen für Sichtbetone (SB2, SB3 und SB4) wird eine Maßhaltigkeit von maximal ± 3 mm bei 1 m Messpunktabstand für die mit dem Verfahren zu erstellenden Betonbauteile angestrebt. Für die Wachs-Schalungsmodule wird daraus abgeleitet eine absolute Oberflächengenauigkeit im Fertigungsprozess von ± 1 mm angestrebt. Durch die höhere Oberflächengenauigkeit der Wachs-Schalungsmodule sollen mögliche plasto-elastische Verformungen des Wachses aus hydrostatischem Betondruck und kumulativem Lastabtrag gestapelter Wachs-Schalungsmodule (zeit- und temperaturabhängige Verformung des Wachses) berücksichtigt werden.

Mehrfachverwendung der Schalung

Auch die Mehrfachverwendung der Schalung ist zu berücksichtigen. Sollen mehrere formgleiche Bauteile, wie z. B. vier gleichgeformte Außenstützen mit denselben Wachs-Schalungsmodule, hergestellt werden, sollen auch die Bauteile der zweiten, dritten und vierten Abformung die angestrebte Oberflächengenauigkeit erfüllen.

Form und Komplexität/Erstellbare geometrische Formen

Generell lässt sich mit dem geplanten Verfahren nahezu jede geometrische Form abbilden, die im fünfschigen Fräsprozess bei der Verwendung unterschiedlicher Werkzeuge herstellbar ist. Hierzu zählen Grate und Kanten mit unterschiedlichen Winkeln, Nuten sowie verschiedene Radien von konvexen und konkaven ein- und zweisinnigen Krümmungen. Mit steigender Komplexität und steigendem Detaillierungsgrad der Form wird lediglich die Bearbeitungszeit des Fräsprozesses erhöht. Anhand einer geeigneten Testgeometrie wird die Fräsbarkeit hinsichtlich der erreichten Maßhaltigkeit durch einen Soll-Ist-Abgleich zwischen dem digitalen Modell und einem 3D-Scan untersucht.

Modulabmessung

Die Abmessungen der *Basis-Wachs-Schalungsmodule* werden auf eine Grundfläche von 70 cm x 70 cm ausgelegt. Die jeweilige Höhe des aufgepressten Wachsblocks ist abhängig von der zu erstellenden Gesamtform und kann zwischen 10 bis 110 cm variieren. Zwar sind transportbedingt Module mit einer maximalen Breite von bis zu 2,55 m möglich, aus baupraktischer Sicht ist jedoch eine kleinere Modulgröße sinnvoll, da damit besser auf die Kontur des zu erstellenden Betonbauteils Rücksicht genommen werden kann. Zudem erleichtert die Beschränkung der Modulgröße das Handling im Produktionsprozess. Für die Bearbeitung ist die gewählte Abmessung günstig, da sie den Arbeitsbereich der geplanten Roboterfräse optimal ausfüllt.

Systemgröße der aus Modulen zusammengesetzten Gesamtschalung

Wie zuvor beschrieben, werden die individuell geformten Wachs-Schalungsmodule im Fertigteilwerk oder auf der Baustelle zu einer Gesamtschalung für das zu betonierende Bauteil zusammengesetzt. Da die überwiegende Mehrheit der Betonierabschnitte im Betonhochbau das vertikale Maß von 10 m nicht überschreitet, werden die Verfahrenskomponenten auf diese Maximalhöhe ausgelegt. Da nur die Höhe für den hydraulischen Druck des Betons als Belastung von Relevanz ist, wird die Breite der Gesamtschalung für die durchzuführenden Versuche auf ein Modul begrenzt. Für die späteren baupraktischen Anwendungen kann das System in horizontaler Richtung beliebig erweitert werden.

Formhaltigkeit der Stahlverbindungseinheit

Die Stahlverbindungseinheit bildet die zentrale Schnittstelle des Verfahrens. Sie dient nicht nur als exakte Fixierung/Positionierung des Wachses im Bearbeitungsprozess und auf der Baustelle, sondern stellt auch die Verbindung der einzelnen Wachs-Schalungsmodule untereinander sicher. Um die Genauigkeit des gesamten Verfahrens sicherzustellen, muss aus verschiedenen Gründen die Verformung der Stahlverbindungseinheit auf ein Minimum reduziert werden: Da die Stahlverbindungseinheit den unteren Abschluss des Wachsrohlings im Pressprozess bildet, würde sich eine Verformung auf die Maßhaltigkeit des Rohlings auswirken und so eine Bearbeitung der Seiten des Rohlings erfordern. Auch bei der Zusammensetzung der Einzelmodule zu einer Gesamtschalung würde sich eine Verformung auf die Kontaktstellen der Module auswirken. Durch die Überschreitung des zulässigen Spaltmaßes würden sichtbare Abdrücke/Rückstände auf dem Betonbauteil zurückbleiben und das Gefüge/Zusammenspiel der Module im Gesamtsystem gestört werden.

Verbindung der Module untereinander und zu bestehenden kommerziellen Schalungssystemen

Es muss eine Verbindungstechnik entwickelt werden, die es erlaubt, die Stahlverbindungsmodule kraftschlüssig untereinander sowie exakt mit den Wachs-Schalungsmodulen verbinden zu können. Da frei geformte Geometrien eventuell nur einen Teil der zu erstellenden gesamten Betonkonstruktion ausmachen, soll sich das Wachs-Schalungssystem mit bestehenden Schalungssystemen kombinieren lassen.

1.4 Vorgehensweise/Inhaltsübersicht

Um das zuvor beschriebene vollautomatisierte Herstellungsverfahren vollumfänglich zu erforschen und somit die Wachsschalungstechnologie zu einem automatisierten und individuellen Herstellungsprozess weiterzuentwickeln, sind einige aufeinander aufbauende Teilprozesse zu erforschen. Anhand der in 1.3.1 und 1.3.2 beschriebenen ökonomischen, ökologischen sowie technischen Anforderungen an die Wachsschalungstechnologie kann das Herstellungsverfahren verifiziert werden. Aufbauend auf den zu erforschenden Teilprozessen gliedert sich diese Arbeit in fünf Kapitel. Wie in Abbildung 1-2 zu erkennen, sind die wichtigsten Teilprozesse zum einen das Pressen von Wachsspänen zu einem Wachsrohling, zum anderen die Fräsbearbeitung von gepressten Wachsrohlingen sowie der gesamte Recycling-Prozess von gepressten Wachsrohlingen. Im Folgenden werden die einzelnen Kapitel kurz zusammengefasst.

In **Kapitel 2** wird im ersten Teil ein Überblick über die Entwicklung des Fertigteilbaus im 20. Jahrhundert dargestellt. Zudem werden die zurzeit am Markt üblichen Herstellungsverfahren für Fertigteile im Hoch- und Tiefbau aufgezeigt. Im Anschluss daran wird auf die Potentiale einer automatisierten und individuellen Fertigung im Allgemeinen eingegangen.

In **Kapitel 3** werden die maßgebenden Prozessparameter sowie Begriffsdefinitionen beschrieben, die zur Erforschung eines automatisierten und individuellen Herstellungsprozesses für Freiformschalungen auf Basis von CFW notwendig sind. Zudem werden vergleichbare Verfahren anderer Fachdisziplinen für die zu erforschenden Teilprozesse aufgezeigt und auf eine Übertragung von etwaigen Prozessparametern auf das zu entwickelnde Verfahren hin untersucht.

In **Kapitel 4** wird auf die Eigenschaften des in den darauffolgenden Versuchsreihen verwendeten ConFormWax (Kapitel 3.1) eingegangen. Der zweite Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Versuchsreihen zur Überprüfung der Anwendbarkeit von ConFormWax als Schalungsmaterial in einem automatisierten und individuellen Herstellungsprozess. Die unterschiedlichen Versuchsreihen können den in Abbildung 1-2 dargestellten Prozessschritten zugeordnet werden. Um den Prozessschritt *B – Automatisierte Fertigung der Wachs-Schalungsmodule* vollumfänglich zu erforschen, müssen Teilprozesse wie das Pressen von Wachs und daraus resultierend die Festigkeiten der Wachsrohlinge (Kapitel 3.2) sowie die Zerspanbarkeit von Wachsrohlingen (Kapitel 3.3) untersucht werden. Im nächsten Prozessschritt *C – Montage der Wachs-Schalungsmodule* werden Versuchsreihen zu Verbindungsmitteln im Wachs und deren Auszugskraft (Kapitel 3.4) und zu geeigneten Trennmitteln (Kapitel 3.5) getestet, um sicherzustellen, dass das Wachs kraftschlüssig mit der SVE und anderen am Markt vorhandenen Schalungssystemen verbunden werden kann und dass Betonbauteile schadensfrei aus der Wachsschalung entschalt werden können. Im letzten Prozessschritt *D – Automatisiertes Recycling der Wachs-Schalungsmodule* wird der gesamte Recyclingprozess erforscht.

In **Kapitel 5** wird anhand drei verschiedener Beispiele die Leistungsfähigkeit des erforschten automatisierten und individuellen Herstellungsprozesses auf Basis der zuvor festgelegten Anforderungen dargestellt. Anhand der verschiedenen Demonstratoren werden zudem die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten dieses Verfahrens im Bauwesen verdeutlicht.

Im letzten **Kapitel 6** werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Zudem werden Ausblicke und Potentiale für weiterführende Forschungsarbeiten bezüglich der Wachsschalungstechnologie dargelegt.

2 Stand der Technik

2.1 Industrielle, serielle Fertigung von Betonbauteilen

2.1.1 Geschichtliche Entwicklung

Betonschalungen sind im Allgemeinen Hohlformen, die als formgebende Negative im Betonbau zu bezeichnen sind [13]. Beton ist im ungehärteten Zustand plastisch formbar und fließfähig. Durch zimmermannsmäßig aus Holzbrettern und Kanthölzern zusammengebaute Formen kann Beton während des Erhärtungsprozesses in Form gehalten werden (Abbildung 2-1, links). Er fließt ähnlich einer Flüssigkeit in fast jede beliebige Form. Die handwerklichen Fähigkeiten des Zimmermanns spiegeln sich in der Betonoberfläche wider.

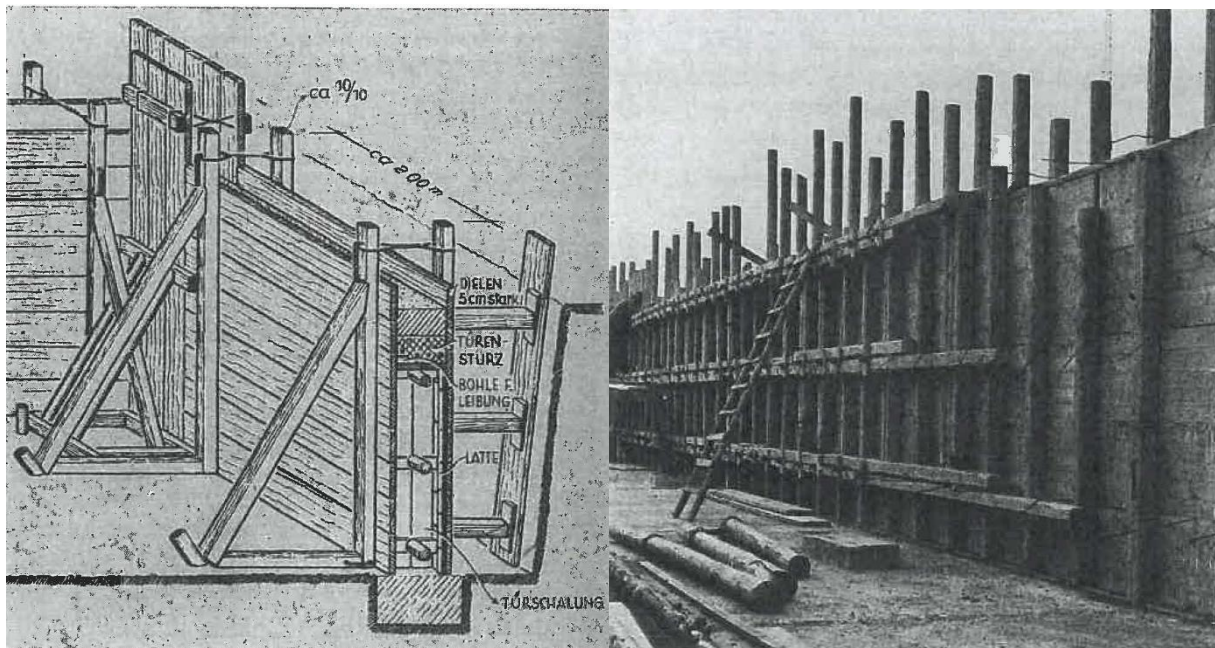


Abbildung 2-1: Schalkonstruktion um 1950 aus Brettern und Kanthölzern, Schalung einer Betonwand mit sogenannten Donau-Schalplatten (v. l. n. r.) [14]

Eine Schalung besteht im Allgemeinen aus einer Vielzahl an einzelnen Elementen. Die Schalhaut ist der Teil einer Schalung, dessen Oberfläche direkten Kontakt zum Beton besitzt und die somit unmittelbaren Einfluss auf die Oberflächenstruktur, die Maßhaltigkeit und die gewünschte Form hat.

Die Schalhaut ist auf Schalungsträgern montiert. Diese Träger stützen die Schalhaut und dienen dieser als Auflager, um dem Frischbetondruck standzuhalten. Bei einfachen hölzernen Schalungen für gerade Stahlbetonwände (Abbildung 2-1) bilden die Holzbretter die Schalhaut. Kanthölzer bilden die vertikalen Schalungsträger der Schalung und dienen als Auflager für die Schalhaut. Ab 1950 wurden anstatt von Holzbrettern Holztafeln (Abbildung 2-1, rechts) als Schalhaut benutzt, wodurch die Montagezeit der Gesamtschalung verkürzt werden konnte. Der Vorteil eines Baustoffes, der zu Beginn flüssig ist und in fast jede beliebige Form fließt und nach einer gewissen Zeit erhärtet, wurde von vielen Baumeistern erkannt. So entstand im 20. Jahrhundert der architektonische Begriff der *Freiformarchitektur*. Beispielhaft sind hier Personen wie Calatrava, Candela, Frei Otto und Iser zu nennen, die meist ohne Computer als Hilfsmittel herausragende Freiformen, Schalen und schlanke Betonbauwerke realisierten.

Zur damaligen Zeit war das Verhältnis zwischen Lohnkosten und Material im Gegensatz zu heute umgekehrt. Die Lohnkosten waren niedrig und das Material war teuer. Am Beispiel des zweiten Goetheanums von Rudolf Steiner wird dieser Gegensatz zu heute deutlich.

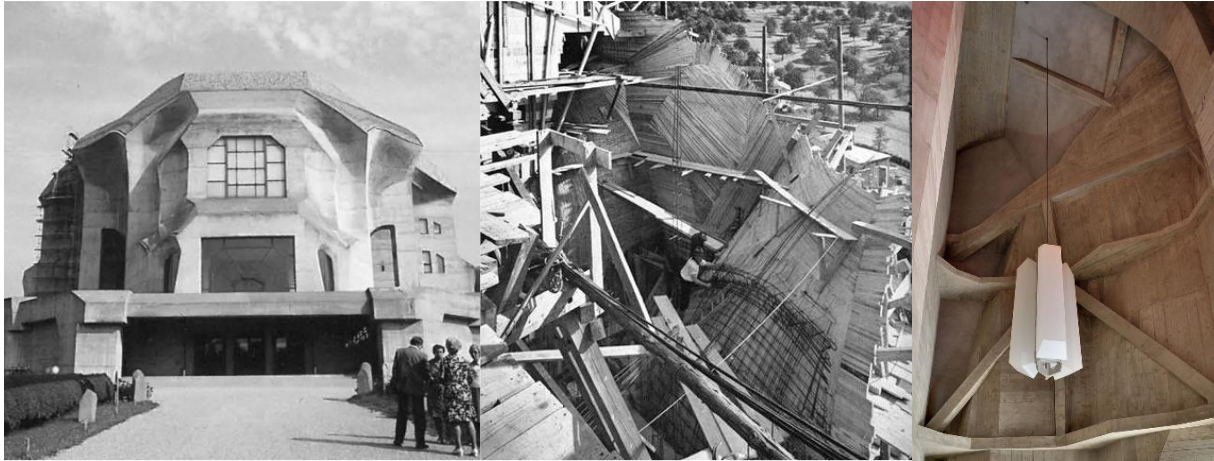


Abbildung 2-2: Rudolf Steiner/Ernst Aisenpreis2. Goetheanum in Dornach, manuell aus Brettern hergestellte Einschalung des 2. Goetheanums, nach dem Ausschalen hergestellte, komplexe Stahlbetongeometrie des 2. Goetheanums (v. l. n. r.) [15, 16]

Der Entwurf von Steiner spiegelt eine komplexe *organische Architektur* [16] wider, deren Umsetzung zur damaligen Zeit herausragend war. In Abbildung 2-2 ist links das zweite Goetheanum zu sehen. In Abbildung 2-2 mittig wird deutlich, welch immenser händischer Aufwand notwendig war, um solch komplexe Betonbauteilgeometrien (Abbildung 2-2 rechts) herzustellen. Da diese Schalungsformen (Abbildung 2-2, mittig) von einfachen Zimmerleuten nicht hergestellt werden konnten, wurden in Anlehnung an den ebenfalls komplizierten Bau hölzerner Schiffsrümpfe Schiffsbauer mit dieser Aufgabe betraut. Die Herstellkosten der Schalung wären in der heutigen Zeit wirtschaftlich unvorstellbar und würden die Baukosten für solch ein Projekt enorm ansteigen lassen.

Am Beispiel des Trans World Airline Terminals in New York von 1956 (Abbildung 2-3) wird ebenfalls der hohe händische Aufwand zur Herstellung von Freiform-Betonbauteilen deutlich.

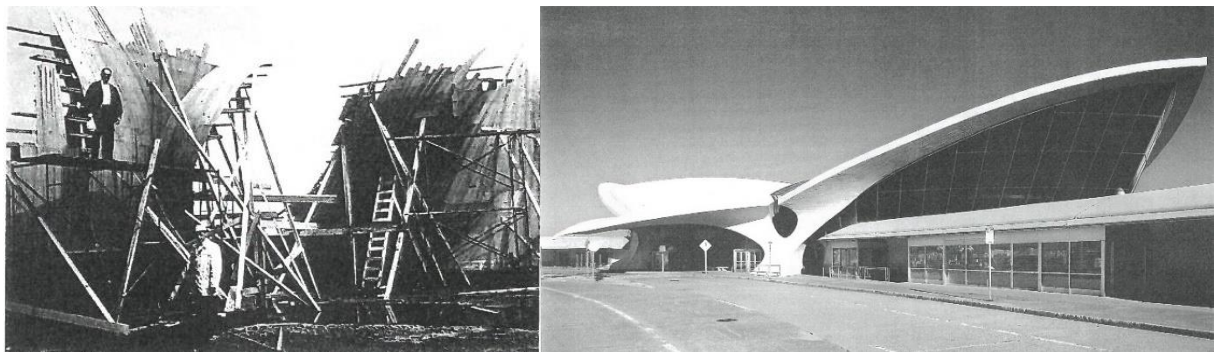


Abbildung 2-3: Herstellung der Schalung für den Trans World Airlines Terminal, fertig hergestelltes Trans World Airlines Terminal in New York von 1956 (v. l. n. r.) [15]

Zeitgleich wurden neben den aus Holzwerkstoffen händisch hergestellten Freiform-Geometrien für Standardbauteile aus Beton Holzpfeilen und Kanthölzer durch längenverstellbare Stahlrohre und Stahlträger ersetzt. Diese industriell gefertigten Stahlhalbozeuge konnten mehrfach verwendet werden, was den Holzverbrauch reduzierte.

Aus der Überlegung, Schalungselemente aus Materialien zu fertigen, die dem Wiederverwendungsgedanken gerecht wurden, entwickelte sich mit der Zeit ein neuer Industriezweig. Durch diese Entwicklung wurden in Anlehnung an andere Industriezweige wie die Gusseisen-, Schmiedeeisen- und Glasproduktion auch Betonbauteile im Werk vorproduziert und auf der Baustelle montiert. [17]

Der Begriff *Vorfertigung* beschreibt im Allgemeinen die Fertigung von Bauteilen, die nicht an der im Bauwerk vorgesehenen Stelle produziert werden. [15] Eine Vorfertigung von Betonbauteilen im Werk und deren spätere Montage auf der Baustelle fanden schon um 1900 statt. Um 1850 hatte Joseph

Monier einen Blumentopf aus Stahlbeton hergestellt (Abbildung 2-4 links). Auch wenn dieser Blumentopf dem heutigen Gedanken an ein Stahlbetonfertigteile nicht gleicht, wurden ca. 50 Jahre später um 1900 schon ganze Bauwerke vorproduziert und auf der Baustelle montiert. Ein Beispiel hierfür ist ein vorgefertigtes Bahnwärterhaus, das vom französischen Bauingenieur François Hennebique entworfen und von Züblin gebaut wurde (Abbildung 2-4 rechts).

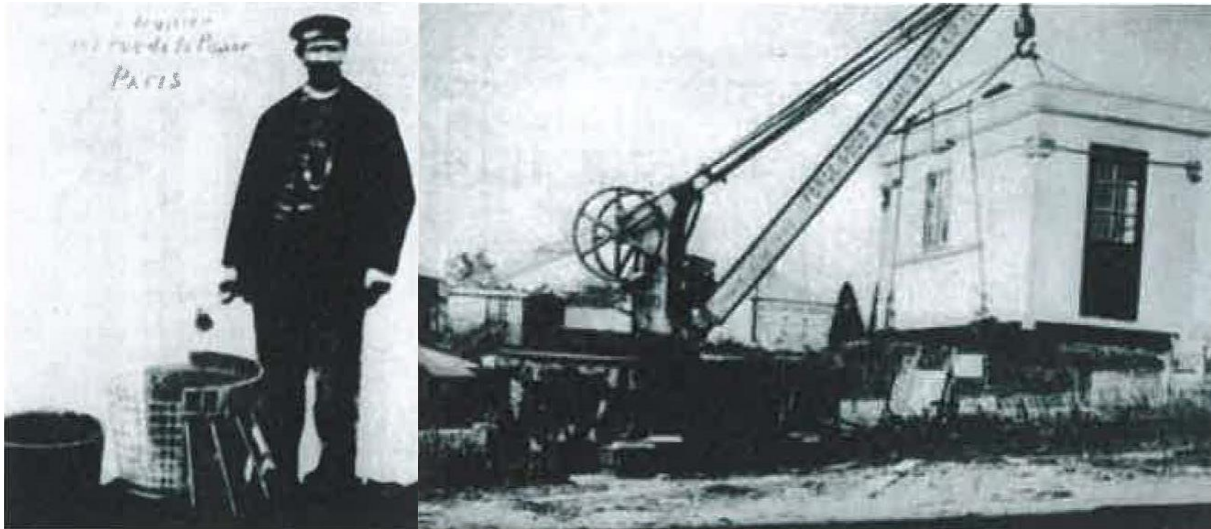


Abbildung 2-4: Joseph Monier um 1900, vorgefertigtes Bahnwärterhaus um 1900 (v. l. n. r.) [18]

Auch Le Corbusier sah früh die Vorteile einer industriellen Produktion von Betonbauteilen und sagte schon 1925 „Hören wir auf die Ratschläge der amerikanischen Ingenieure – fürchten wir die amerikanischen Architekten!“ [19]. Er meinte damit, dass die Architektur an die industrielle Produktion gekoppelt werden müsse, um im gleichen Zug die Arbeit des Architekten der Arbeit des Ingenieurs anzunähern [17]. Aus dem gleichen Gedanken heraus entwarf Richard Buckminster Fuller 1927 das sogenannte *dymaxion house*, das ein Wohnhaus für eine Familie darstellt (Abbildung 2-5).

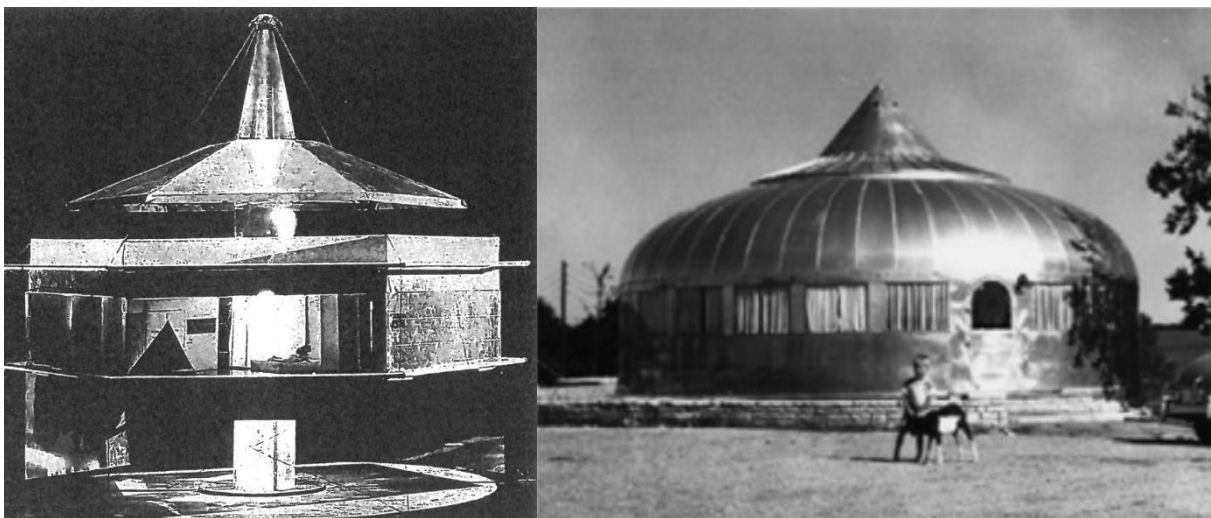


Abbildung 2-5: Modell des Dymaxion-Hauses von Richard Buckminster Fuller, Prototyp des Dymaxion-Hauses von 1927 (v. l. n. r.) [15]

Die Geometrie des Hauses folgt einer Kreisform und wurde aus dem industriellen Gedanken heraus entworfen, größten Nutzen bei gleichzeitig niedrigem Energie- und Materialverbrauch zu erhalten. Dieser Entwurf versucht allen zur damaligen Zeit bekannten technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Standards einer Massenproduktion in Anlehnung an die Automobilindustrie zu folgen [15]. Das Haus war demontabel und bestand aus einer leichten Hängekonstruktion (Abbildung 2-5

links). Es konnte an einem beliebigen Ort montiert und bei einem Umzug demontiert und transportiert werden. Dieser Entwurf ähnelt dem Begriff der *Wohnmaschine* von Le Corbusier. [17]

Diese visionären Gedanken einer Industrialisierung des Bauens von Fuller und Le Corbusier wurden in Europa kaum wahrgenommen. Die Entwicklung einer industriellen Fertigung hierzulande stagnierte in den folgenden Jahren und wurde erst in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wieder fortgesetzt. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts größere und flexiblere Hebegeräte wie Kräne vorhanden waren, mit denen vorgefertigte und schwere Betonbauteile vor Ort bewegt, gehoben und montiert werden konnten.

Nach dem zweiten Weltkrieg stand die Bauwirtschaft vor einer großen Bauaufgabe. Viele Menschen verloren im Krieg ihre Wohnungen, woraus großer Wohnungsbedarf entstand. Durch den Mangel an Werkstoffen wie Holz, Betonstahl und Zement sowie durch einen Fachkräftemangel nach dem Krieg musste eine rationale Lösung des Problems gefunden werden. Diese Bauaufgabe war mit der zu dieser Zeit üblichen Bauweise, bestehend aus Ziegel- oder Steinwänden und Decken aus Holzbalken mit Beplankung, nicht zu bewältigen und mit dem damit verbundenen hohen Bedarf an Holz nicht umsetzbar. Zudem wurde nach dem Krieg aufgrund der Zerstörungen während des Kriegs der Wunsch laut, Decken feuerhemmend auszuführen. Auch die Anforderungen an den Schall- und Wärmeschutz stiegen mit den Jahren. In Frankreich und Skandinavien zeichnete sich ein Trend ab, der auch in Deutschland immer mehr Anklang fand. Durch leistungsfähigere Hebewerkzeuge konnte die Großtafelbauweise, auch Plattenbauweise genannt, die auf vorgefertigten flächigen Platten und Wandscheiben aus Stahlbeton als Einzelbauteile basiert und vor Ort zu einem Gesamtbauwerk montiert wurde, Einzug in die Bauwelt halten und bot eine schnelle und wirtschaftliche Alternative zur klassischen Ortbetonbauweise.



Abbildung 2-6: Montage eines vorgefertigten Wandelements [20], Montage einer vorgefertigten Deckenplatte (v. l. n. r.) [21]

Die Bauteilabmessungen dieser Wand- und Deckenelemente betrugen max. ca. 3,0 m x 6,0 m. Die maximalen Abmessungen der Plattenbauweise reichten aus, um Wohnräume bereitzustellen. Durch die damalige Schalungstechnik im Werk und die damit einhergehende geringere individuelle Gestaltungsmöglichkeit prägt der Begriff *Betonwüste* diesen Baustil speziell bei Großwohnsiedlungen bis heute. Er ist jedoch nicht auf das Bauverfahren selbst, sondern auf die mit diesem Bauverfahren hergestellte Großwohnungssiedlung und das damit einhergehende einheitliche Erscheinungsbild zurückzuführen. Zeitgleich zum Wohnungsbau wurde der Bedarf an weitspannenden, großvolumigen und industriell nutzbaren Bauwerken in Form von Hallen größer. Die Plattenbauweise konnte dieser Bauaufgabe nicht gerecht werden, da für nutzbare Hallen größere Spannweiten von Nöten waren. Für diese Bauwerke wurden lineare, stabförmige Fertigteile in Form von Stützen, Trägern und weitgespannten Deckenplatten skelettartig zu einem Bauwerk verbunden. Diese Konstruktionsart wird *Skelettbau* genannt (Abbildung 2-7).

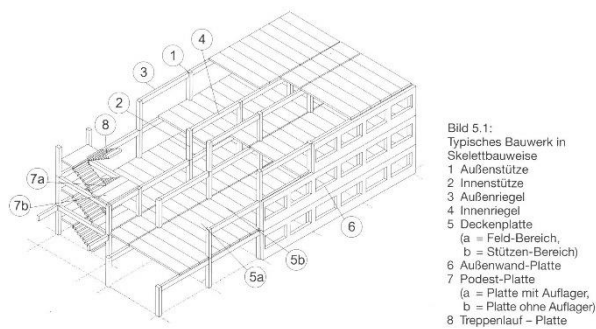


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Skelettbauweise mit Bauteilbezeichnungen [22], Stahlbeton-Skelettbau (Foto: H. Kloft) (v. l. n. r.)

Die Plattenbauweise findet sich heute durch ihr uniformes Erscheinungsbild nur noch selten in Deutschland. Speziell im Wohnungsbau in Deutschland ist der Wunsch nach Individualität hoch. Jeder Bauherr möchte seine Vorstellungen eines Wohnhauses nach seinen Bedürfnissen entwerfen und planen. Individuelle Einzellösungen werden gewünscht. Aus diesem Grund ist es heutzutage immer noch üblich, Betonbauteile in Ortbetonbauweise herzustellen. Trotzdem werden im Wohnungsbau häufig vorgefertigte Bauelemente eingesetzt. Deckenplatten und Kellerwände werden fast ausschließlich aus vorgefertigten Betonelementen hergestellt. Die Elementdecke, auch Filigrandecke genannt, ist ein Stahlbetonhalbfertigteil, das im Werk vorproduziert wird und nach der Montage auf der Baustelle mit einer Ortbetonschicht ergänzt wird (Abbildung 2-8). Das vorgefertigte Deckenelement (Halbfertigteil) wird im Werk speziell für jede Baustelle nach statischen Anforderungen produziert. Die untere Lage der Bewehrung und ebenso die Leerrohre für einen späteren TGA-Ausbau werden schon werkseitig eingebaut. Nach der Montage des Halbfertigteils und einer temporären Unterstützung der Elementdecken mit Stützen (Abbildung 2-8 rechts) wird die obere Bewehrungslage ergänzt und im Anschluss wird die fehlende Ortbetonschicht aufgebracht. Das Halbfertigteil fungiert während der Betonage als verlorene Schalung. Eine zusätzliche Deckenschalung ist somit nicht notwendig. Mit Hilfe dieser Herstellungsmethode kann das Halbfertigteil gleichzeitig mit der Herstellung der Wände vor Ort produziert werden. Zudem sind Zeiteinsparungen durch die leichte Montage (Verlegen) der Deckenplatten mit Hilfe eines Mobilkrans vor Ort möglich, da die Deckenkonstruktion zum einen nicht eingeschalt werden muss und zum anderen die untere Bewehrungslage schon im Halbfertigteil vorhanden ist. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Qualität der Deckenunterseite des Halbfertigteils (Abbildung 2-8 rechts). Solch eine Oberflächenqualität im Betonbau ist in Ortbetonbauweise nur unter hohem Kosten- und Schalungsaufwand möglich.



Abbildung 2-8: Elementdecke als Halbfertigteil inkl. unterer Bewehrungslage und Abstandshaltern für obere Bewehrungslage; Stützung einer Elementdecke während der Betonage und des Aushärtungsprozesses der Ortbetonschicht (v. l. n. r.) [23]

Ebenfalls werden Kellerwände durch gesteigerte Anforderungen bezüglich Rissbegrenzung und Dauerhaftigkeit immer häufiger aus doppelwandigen Elementwänden hergestellt. Im Werk werden, ähnlich wie bei der Elementdecke, zwei dünne Fertigteilplatten, die durch Gitterträger verbunden sind, produziert (Abbildung 2-9). Die Bewehrung wird in beide Fertigteilplatten werkseitig integriert. Vor Ort werden diese Elementwände mit Hilfe eines Mobilkrans montiert und mit geeigneten Abstützungen

lagegesichert (Abbildung 2-9 rechts). Auch hier fungieren die beiden Fertigteilplatten als verlorene Schalung. Anschließend wird der Hohlraum zwischen den Fertigteilplatten mit Ortbeton ausgegossen.



Abbildung 2-9: Elementwand mit zwei gegenüberliegenden Fertigteilplatten, die durch Gitterträger verbunden sind; Montage einer Elementwand; die Anschlussbewehrung der Bodenplatte kann integriert werden. Nach der Montage wird der Hohlraum zwischen den beiden Fertigteilplatten mit Ortbeton ausbetoniert (v. l. n. r.) [24, 25]

Die beiden zuvor beschriebenen Herstellungsmethoden mittels Halbfertigteil vereinen die Vorteile der Ortbetonbauweise und der Fertigteilbauweise. Vorteile der Fertigteilproduktion sind zum einen die hohen Oberflächenqualitäten und die zeitgleiche Produktion von z. B. Deckenelementen, während die Wände vor Ort gemauert werden, und zum anderen die Einsparung der bei Ortbeton notwendigen Schalungstechnik. Zudem können durch die Ortbetonergänzung zwei nebeneinanderliegende Betonbauteile monolithisch und kraftschlüssig miteinander verbunden werden. So können auch Mehrfeldsysteme durch eine Anordnung von Stützbewehrung mit Hilfe dieser Halbfertigteilsysteme realisiert werden, was im reinen Fertigteilbau nur bedingt möglich ist. Diese Herstellungsmethoden sind von Baustellen heutzutage nicht mehr wegzudenken, wurden jedoch schon vor einigen Jahrzehnten entwickelt. Erste Hinweise auf großformatige, massive Deckenplatten sind schon 1958 im Betonstein-Jahrbuch von v. Halacz zu finden und 1968 wurde von Neubarth die zuvor genannte Herstellungsmethode der Elementdecke in einem Beitrag erwähnt. Auch die Idee der Elementwände wurde schon 1973 in einem Beitrag von Manleitner über *Wandtafeln und Deckenplatten aus Beton* beschrieben [26]. Obwohl diese Herstellungsmethoden schon vor rund 50 Jahren beschrieben wurden, hielten diese Entwicklungen erst in den letzten rund 20 Jahren auf den Baustellen hierzulande Einzug. Diese Tatsache zeigt die in Deutschland herrschende Trägheit der Bauwirtschaft und die Abneigung gegen neue und innovative Bauprodukte in Bezug auf Wohnungsbau. Lediglich in der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) sowie der Wärmedämmung von Gebäuden sind in den letzten Jahren neue und innovative Produkte am Markt eingeführt worden.

Im Gegensatz dazu werden im Industriebau schon seit etlichen Jahren Hallensysteme in Skelettbauweise mit Fertigteilen aus Stahlbeton hergestellt (Abbildung 2-7). Anders als beim Wohnungsbau steht beim Industriebau der Nutzen und somit die Zweckmäßigkeit im Vordergrund und der architektonische Entwurf spielt hierbei eine untergeordnete Rolle. Es muss möglichst viel Fläche und damit auch Volumen kostengünstig, schnell und rational bereitgestellt werden. Die Einhaltung der geplanten Bauzeit und eine möglichst schnelle und problemlose Durchführung der Baumaßnahme können nur durch den Einsatz von Fertigteilen gewährleistet werden. Zudem kann durch die Vorproduktion der Betonbauteile im Werk und die reine Montage auf der Baustelle auch in Schlechtwetterzeiten und im Winter montiert werden.

Wird entwurfsbedingt von rechteckigen und quadratischen Grundflächen und Bauteilgeometrien abgewichen, können diese komplexen Geometrien derzeit entweder aufwendig in Ortbetonbauweise hergestellt oder durch Sonderschalungen im Werk vorproduziert werden. Die Herstellung von komplexen Bauteilgeometrien vor Ort gleicht in der Gegenwart noch den Ausführungen von vor 100 Jahren.

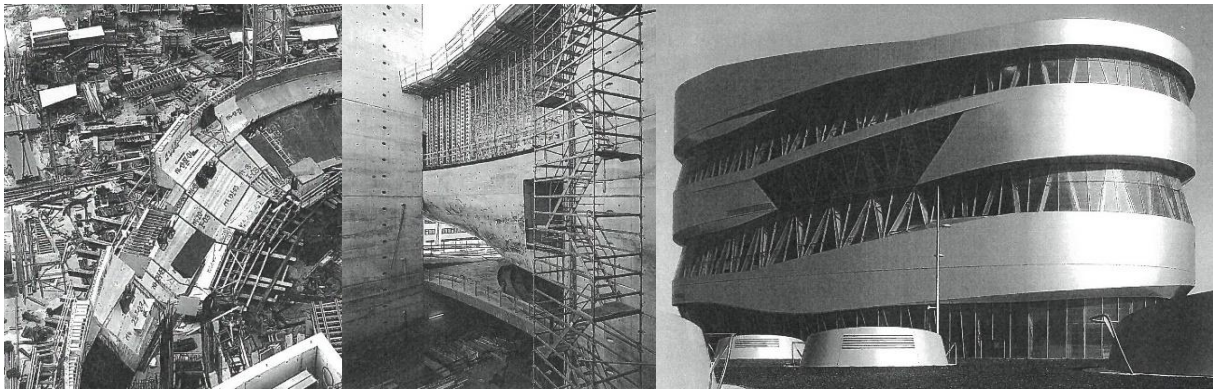


Abbildung 2-10: Schalungsbau auf der Baustelle; ausgeschaltes Stahlbetonbauteil; fertiges Mercedes Benz Museum von UNStudio (v. l. n. r.) [17]

Am Beispiel des Mercedes-Benz-Museums (2006) in Stuttgart von UNStudio werden die Auswirkungen eines komplexen Entwurfs auf die daraus resultierenden herzustellenden Betonbauteile und damit auf den komplexen Schalungsbau deutlich. Ein Vergleich der Abbildung 2-10 rechts mit der Abbildung 2-3 rechts zeigt, dass sich zwischen fast 100 Jahren Beton- und Stahlbetonentwicklungen der Schalungsbau kaum weiterentwickelt hat. Um solche Geometrien herzustellen, müssen immer noch aufwendig kleinformige Holzwerkstoffe in Form von Platten und Brettern zu einer Gesamtschalung zusammengefügt werden. Lediglich die Beschichtungen der Holzwerkstoffe sowie die Trennmittel wurden verbessert, um eine bessere Betonoberfläche zu erhalten. Auch eine teilmaschinelle Vorkonfektionierung der benötigten Holzplatten und -bretter wird derzeit auf Baustellen eingesetzt.

Die Lohnkosten steigen mit einer Zunahme der Komplexität der einzuschalenden Betonbaugeometrien exponentiell an. Um dennoch komplexe Betonbauteile herstellen zu können und gleichzeitig die Herstellungskosten im Rahmen zu halten, wurde schon vor einigen Jahren versucht, diese Betonbauteile im Werk vorzufertigen und auf der Baustelle zu montieren. Ein Beispiel hierfür ist der neue Zollhof in Düsseldorf, der von Frank O. Gehry entworfen und 1999 fertig gestellt wurde. Der Gesamtentwurf unterteilt sich in drei Gebäude A, B und C, die sich jeweils in ihrer Geometrie sowie in den verwendeten Baustoffen der Fassade unterscheiden. Alle drei Gebäude wurden in Stahlbetonbauweise errichtet. Bei Gebäude A weist die Kubatur zwar schräge, in sich jedoch ebene Fassadenflächen auf, wohingegen bei Gebäude B und C starke Verformungen, Freiformflächen mit unterschiedlichen Krümmungsradien und Abweichungen vom Lot das Fassadenbild bestimmen. Gebäude B stellt zwar das kleinste der drei Gebäude im Entwurf da, setzt jedoch durch eine komplexe Bauteilgeometrie die höchsten Anforderungen an die Schalungstechnik. Solche rechnerbasierten Geometrien lassen sich zum einen nicht mehr auf einen 2D-Plan wie Grundriss und Schnitt unterbrechen und zum anderen nicht mit konventioneller Schalungstechnik manuell herstellen. In Anlehnung an andere produzierende Industriezweige wurde ein Verfahren verwendet, das die digitalen Daten computergesteuert weiterverarbeiten kann. In der metallverarbeitenden Industrie werden digitale Modelldaten vom Computer direkt an CNC-Maschinen (Computerized Numerical Control) übergeben, die aus einem Werkstück die Zielgeometrie herausfräsen. Mit Hilfe dieser Herstellungsmethode wurden einzelne Bauteilgeometrien an eine CNC-Fräse übergeben, die mittels Zerspanung aus Styropor die Zielgeometrie herstellte. Die gefräste Styropor-Geometrie stellt das Negativ des herzustellenden Betonbauteils dar. Mehrere Styropor-Negativformen wurden zu einer Gesamtschalung im Werk zusammengesetzt. Durch diese Herstellungsmethode konnten beliebig komplexe Bauteilgeometrien wirtschaftlich und kostengünstig vorproduziert und auf der Baustelle montiert werden (Abbildung 2-11). Der neue Zollhof in Düsseldorf (Gebäude B) war das erste Gebäude, das vollständig mit dieser Methode hergestellt wurde. Durch diese Herstellungsmethode wurde viel Styropor verbraucht, das durch die Beschichtung der Schalhaut mit Trennmitteln nicht wiederverwendet werden konnte. Somit ist diese Herstellungsmethode zwar ökonomisch, jedoch nicht ökologisch sinnvoll. Sie ist bis dato der einzige Weg, solch komplexe Betonbauteile zu realisieren. [17]



Abbildung 2-11: Darstellung der drei Gebäude A, B, C des neuen Zollhofs in Düsseldorf während unterschiedlicher Bauzustände; Zusammenbau der aus EPS gefrästen Schalung für die Herstellung von freigeformten Stahlbetonwänden; mit aus EPS gefrästen Schalungen hergestellte freigeformte Stahlbetonwände (v. l. n. r.) [27]



Abbildung 2-12: neuer Zollhof in Düsseldorf – Darstellung der einzelnen Gebäude C, B, A (v. l. n. r.) [28]

2.1.2 Gängige Herstellungsverfahren für Betonfertigteile

2.1.2.1 Betonfertigteile im Hochbau

Fertigteile werden mit einer Vielzahl unterschiedlicher Herstellprozesse produziert. Die Spanne reicht von fast komplett automatisierten Herstellungsprozessen im Fertigteilwerk für Beton- und Stahlbetonfertigteile mit einfachen und/oder wiederkehrenden Geometrien und gleichzeitig hoher Stückzahl bis hin zu manuell hergestellten individuellen Schalungen für komplexe 3D-Freiformschalungen für den einmaligen Gebrauch. Aufgrund der vielen Schalungshersteller am Markt und des zum Teil nicht publizierten oder rein auf Erfahrung aufbauenden Wissens bezüglich der Herstellung von Freiformschalungen in den Firmen ist ein vollumfänglicher Vergleich aller Verfahren am Markt kaum möglich. Grundsätzlich soll in diesem Abschnitt die Divergenz zwischen dem Automatisierungsgrad von Produktionsprozessen für Betonbauteile und der Individualität der herstellbaren Geometrien anhand einiger Beispiele verdeutlicht werden.

Die Herstellung von Fertigteilen im Werk unterteilt sich in zwei Hauptkategorien:

- Umlauffertigung
- Standfertigung

Bei den automatisierten Herstellprozessen der Fertigteilindustrie gibt es eine Vielzahl an manuellen oder semi-manuellen Fertigungsverfahren.

Umlauffertigung

Die Umlauffertigung eignet sich besonders für die Herstellung flächiger und dünnwandiger Bauteile wie Wände und Deckenplatten. Bei dieser Fertigungsart sind Teilprozesse wie die Montage der Schalung, das Integrieren von Bewehrung sowie die Betonage etc. stationär im Werk verortet und das herzustellende Bauteil durchläuft die entsprechenden Anlagen ähnlich wie bei einer Fließbandproduktion. In Abbildung 2-13 ist ein schematischer Aufbau einer Umlauffertigungsanlage dargestellt.

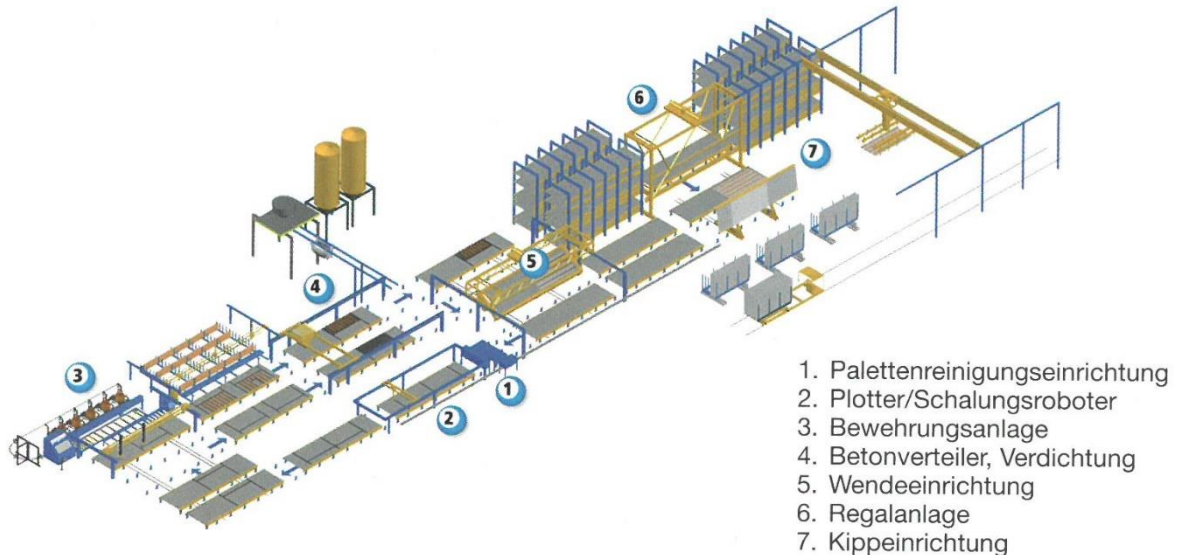


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Umlauffertigungsanlage [22]

Die Schalung besteht bei diesem Herstellungsverfahren aus einer immer gleichen Grundplatte in Form einer großformatigen Palette. Die Schalhaut bildet eine ebene Stahlplatte. Nachdem die Stahlpalette maschinell gesäubert wurde, wird die benötigte Geometrie des herzustellenden Betonbauteils vom Computer an die Anlage digital übergeben. In der Vergangenheit wurden mit Hilfe von großformatigen Druckern, Plotter genannt, die Positionen der Formseitenteile (Abbildung 2-14) auf die Stahlpalette gedruckt. Arbeiter mussten im Nachgang die Formseitenteile so exakt wie händisch möglich auf der Stahlpalette fixieren. Heutzutage werden die seitlichen Konturen der herzustellenden Stahlbetonwand sowie Öffnungen für Türen und Fenster mit Formseitenteilen aus Stahl mit Hilfe eines Roboters präzise positioniert und von Magneten positionsgenau auf der Stahlplatte fixiert.

Auf dieser Stahlpalette können somit beliebige rechteckige Wand- aber auch Decken-Geometrien hergestellt werden. Jedoch kann die Dicke des Betonbauteils pro herzustellendes Element nicht verändert werden. Nachdem der Bewehrungskorb in die Schalung eingesetzt wurde, kann die Wand betoniert werden. Nach der Betonage und einer Nachbehandlung wird das Betonbauteil inklusive Stahlpalette in einem Regalsystem gelagert und nach dem Erhärtungsprozess entschalt und zur Baustelle transportiert. Nach Gebrauch der Stahlpalette und der Formseitenteile werden diese gereinigt und in den Produktionsprozess zurückgeführt. In Abbildung 2-15 sind die wichtigsten Teilprozesse einer Umlauffertigung dargestellt.

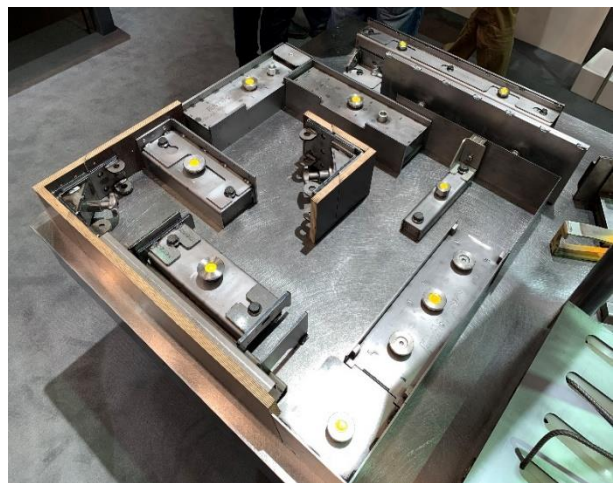


Abbildung 2-14: Darstellung unterschiedlicher, magnetisch haftender Formseitenteile



Abbildung 2-15: Robotergestütztes Platzieren der Formseitenteile, Integration des Bewehrungskorbs in die Schalung, Nachbehandlung der Oberfläche durch maschinelles Abreiben des betonierten Betonbauteils, Entnahme der erhärteten Betonwand mittels Kipptisch (v. l. n. r.) [22]

Die Vorteile dieser Fertigungsweise liegen zum einen in der festen Verortung der einzelnen Teilprozesse im Werk und zum anderen in der Flexibilität der herzustellenden Wand-Geometrien. Durch eine feste Verortung der Teilprozess im Werk werden sowohl die Produktivität als auch die Qualität gesteigert, da in solch einer Umlauffertigung ein hoher Grad an maschineller Automatisierung erreicht werden kann und die Arbeiten, die noch händisch stattfinden, immer am selben Ort und somit routiniert ausgeführt werden können.

Dank der Einsatzmöglichkeiten von Robotern können beliebige, rechteckige Wand-Geometrien wirtschaftlich hergestellt werden. Nachteilig ist, dass die Wand und deren Öffnungen meist nur rechtwinklige Ecken besitzen dürfen und die Bauteildicke einer Wand nicht variabel ist. Dazu kommt, dass bedingt durch diese Herstellungsart viel Masse in Form der Stahlpaletten inkl. Betonbauteil umlaufend transportiert werden muss. Ein weiterer Nachteil ist, dass bei diesem Herstellungsverfahren nur eine Wandseite und die Ränder des Betonbauteils direkten Kontakt zur Schalhaut haben und somit hohe Oberflächenqualitäten besitzen. Die oberliegende Bauteiloberfläche liegt nicht auf einer Schalhaut auf und muss dementsprechend aufwendig nachbehandelt werden, um eine hohe Qualität ähnlich jener der Unterseite des Betonbauteils zu gewährleisten (Abbildung 2-15 zweites von rechts).

Standfertigung

Um massive, lange oder komplexe Formen wie TT-Platten mit ggfls. Vorspannung herstellen zu können, kommt ein weiteres Verfahren im Fertigteilwerk zum Einsatz. Die Standfertigung ermöglicht es, Wand- und Skelettbau-Fertigteile wirtschaftlich herzustellen. Bei der Standfertigung sind im Gegensatz zur Umlauffertigung die Schalungen für die herzustellenden Betonbauteile stationär verortet und die restlichen Teilprozesse wie die Integration von Bewehrung, die Betonage und die Nachbehandlung sind mobil. Aufgrund des höheren Gewichts und der längeren Bauteilformate der herzustellenden Betonbauteile ist eine Umlauffertigung für solche Bauteile nicht zielführend. Die Formen sind ebenfalls aus Stahl hergestellt, da diese mehrfach verwendet werden. Ein flexibler und robotergestützter Aufbau der Stahlschalungen ist in der Standfertigung bedingt durch die komplexen Formen kaum möglich. In Abbildung 2-16 sind Beispiele für Stahlschalungen abgebildet, die in der Standfertigung zum Einsatz kommen.



Abbildung 2-16: Beispiele für Fertigteilerschaltungen im Standfertigungsverfahren, Schalung für die Herstellung rechteckiger Betonunterzüge, vorspannbare TT-Platten-Schalung, Batterieschalung zur Herstellung von Wandelementen, Stahlschalung für Betonbauteile in Form eines umgekehrten U (v. l. n. r.) [22]

Das Spektrum der herstellbaren Bauteilgeometrien reicht von stabförmigen Stützen mit Konsolen (Abbildung 2-7, rechts) und Unterzügen mit Ausbauöffnung (Abbildung 2-7, links) über vorgespannte TT-Platten (Abbildung 2-16, zweites von links) bis hin zu Wand- und Deckenelementen (Abbildung 2-16, zweites von rechts). Der Automatisierungsgrad ist bei der Standfertigung geringer als bei der Umlauffertigung, da keine *Fließbandproduktion* umgesetzt werden kann. Alle Teilprozesse spielen sich nacheinander am gleichen Ort an der Stahlschalung ab. Hierdurch kann es zu Verzögerungen,

Engpässen und dadurch zu Qualitätseinbußen kommen. Die Fehlerquote ist durch den gesteigerten händischen Arbeitsanteil höher, was sich wiederum auf die Qualität und Wirtschaftlichkeit auswirkt. Durch die unterschiedlichen Geometrieforderungen wird für jede benötigte Bauteilgeometrie mindestens eine Stahlform benötigt. Es ist somit keine gemeinsame Basis erkennbar, auf der die unterschiedlichen Geometrien aufgebaut werden können, um einen sinnvollen Einsatz von Robotern oder Maschinen hinsichtlich einer Steigerung der Produktivität zu ermöglichen.

Diese beiden vorgestellten Herstellungsverfahren stellen nur die grundsätzlichen Unterschiede beider Verfahren dar. Auf Basis der Anforderungen an den jeweiligen Produktionsstandort und an die herzustellenden Fertigteile können diese Verfahren ergänzt, kombiniert oder vereinfacht werden. Anhand der herstellbaren Geometrien wird deutlich, dass der händische Aufwand größer wird, je komplexer die herzustellenden Betonbauteile sind. Anders gesagt, je einfacher die herzustellenden Betonbauteile sind, desto größer ist der Automatisierungsgrad im Werk. Hier wird das ambivalente Verhältnis zwischen Automatisierung und Komplexität der herzustellenden Geometrien deutlich. Nur mit hohen Stückzahlen einer gleichen, einfachen Geometrie sind heutzutage Automatisierungen von Teil- oder Gesamtprozessen möglich. Werden individuelle Geometrien in geringer Stückzahl angeboten, sinkt automatisch der Automatisierungsgrad und die händischen/manuellen Arbeiten im Werk steigen an.

2.1.2.2 Betonfertigteile im Tiefbau

Nicht nur im Hochbau wurden Herstellungsprozesse über die Jahre weiterentwickelt, um kostengünstiger, qualitativ hochwertiger und schneller produzieren zu können. Ein großer Markt im Fertigteilbau sind Infrastrukturbauwerke für die Abwassertechnik. Rohre und Schächte werden seit Jahren aus Beton und Stahlbeton hergestellt (Abbildung 2-17). Bei diesen Bauteilen steht der Nutzen im Vordergrund. Architektonische Vielfalt ist zum einen nicht gewünscht und zum anderen durch die strenge Normung der Bauteile kaum möglich. Durch diese Einschränkung möglicher Geometrien werden in diesem Industriezweig seit geraumer Zeit automatisierte Herstellungsprozesse im Werk für die Fertigteilproduktion von Betonrohren und Betonschächten herangezogen.



Abbildung 2-17: Darstellung einer Lagerfläche eines Fertigteilwerks, das Standard-Betonrohre für die Abwassertechnik produziert. [22]

Aber auch kleinformige Betonprodukte wie Pflastersteine, Betonsteine, Bordsteine usw. werden ebenfalls bedingt durch gleiche Geometrien und hohe Stückzahlen heutzutage ausschließlich maschinell und automatisiert produziert (Abbildung 2-18). Diese kleinformigen Betonprodukte werden

Betonwaren genannt. Der Industriezweig, der sich mit der Herstellung von Betonwaren beschäftigt, wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Die Herstellverfahren von Beton- und Stahlbetonrohren für horizontale unterirdische Rohrleitungen unterteilen sich in zwei Hauptkategorien:

- Rohre mit Erhärtung in der Schalung
- Rohre mit Sofortentschalung



Abbildung 2-18: Darstellung unterschiedlicher Betonwaren in Form von Pflastersteinen, Platten, Pflanzsteinen und Mauersteinen aus Beton. [22]

Wie der Name es vorwegnimmt, gibt es Herstellungsverfahren, bei denen die Rohre in der Schalung verbleiben, bis der Beton erhärtet ist. Diese Verfahren kommen dem klassischen Gedanken einer Schalung nach. Durch hohe Stückzahlen gleicher Geometrien kommen hier fast ausschließlich Stahlschalungen zum Einsatz. Bei der Herstellung mit Erhärtung in der Schalung ist es neben der üblichen vertikalen Herstellung der Rohre ebenfalls möglich, Rohre mittels Schleuderverfahren horizontal herzustellen (Abbildung 2-19).

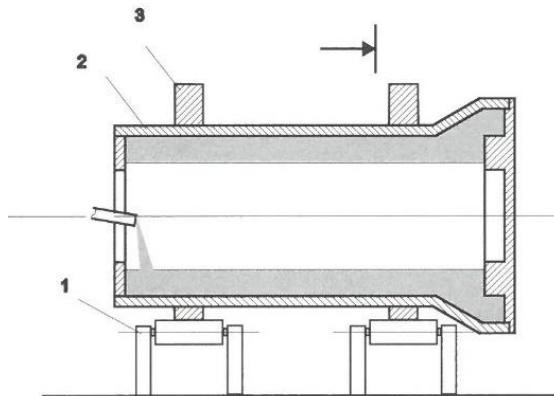


Abbildung 2-19: Schematische Darstellung der Herstellung von Rohren mittels Schleuderverfahren: (1) Rollbank, (2) Form, (3) Laufringe, Schleudieranlage zur Herstellung von Stahlbetonrohren (v. l. n. r.) [22]

Für die Herstellung von Rohren mit Erhärtung in der Schalung müssen eine Vielzahl von Schalungen vorgehalten werden, um eine durchgängige Bauteilproduktion zu gewährleisten. Um die hohe Anzahl an benötigten Schalungen zu verringern und so die Kosten zu senken, stellen Herstellverfahren mit Sofortentschalung eine wirtschaftliche Alternative dar. Dabei werden die Schalungen kurz nach der Betonage entfernt (Abbildung 2-20). Die Rohre erhärten somit vertikal freistehend und ohne stützende Schalung. Aus diesem Grund kann aus statischer Sicht keine horizontale Herstellung stattfinden. Es ist dabei zwingend erforderlich, die Betonrezeptur mittels Zusätze wie Beschleuniger exakt abzustimmen, um kurz nach der Betonage eine Grünstandsfestigkeit zu erreichen und so die Schalung vom Betonbauteil entfernen zu können. Da die Betonbauteile freistehend und ohne Schalung erhärten, ist die Maßhaltigkeit eine kritische Größe und muss durch spezielle Betonrezepturen und ständige Qualitätskontrolle im Werk gewährleistet und überwacht werden.

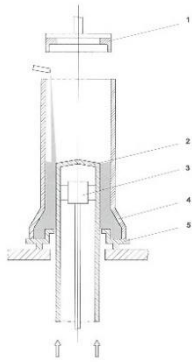


Abbildung 2-20: Schematische Darstellung des Vibrationsverfahrens mit steigendem Kern (Sofortentschalung): (1) Spitzendformer, (2) Kern, (3) Kernvibrator, (4) Außenform, (5) Untering, Rohrfertiger mit steigendem Kern, hergestellte Betonrohre nach dem Entschalen (v. l. n. r.)

Die Herstellung der Bewehrung für diese Rohre in Form von Körben findet ebenfalls vollautomatisch mittels Schweißmaschinen statt, da sich die Kreis-Geometrien der Rohre nur in der Wandstärke und im Durchmesser ändern. In Abbildung 2-21 ist eine Bewehrungskorbschweißmaschine abgebildet.



Abbildung 2-21: Bewehrungskorbschweißmaschine, produzierte Bewehrungskörbe vor dem Einsatz in die Schalung (v. l. n. r.) [22]

Diese Maschine schweißt automatisch entlang gerader stabförmiger Bewehrungsseisen eine spiralförmige und durchlaufende Ringbewehrung auf. Die Durchmesserwahl der einzelnen Bewehrungsseisen kann an die laut Statik erforderlichen Querschnitte angepasst werden. Im Anschluss an die Herstellung der Bewehrungskörbe werden diese in die jeweilige Stahlschalung eingebaut und im Nachgang ausbetoniert. Durch die stetige Weiterentwicklung und durch die Anpassung der Anforderungen an die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten gibt es in diesem Bereich eine Vielzahl von weiteren Herstellprozessen, auf die jedoch in dieser Arbeit nicht im Detail eingegangen wird.

Ähnlich den zuvor beschriebenen Herstellprozessen werden auch vertikal im Erdreich eingebaute Schächte hergestellt, um die unterirdische Infrastruktur und die Rohrsysteme begehen und warten zu können. Diese Schächte dienen oft als Knotenpunkte, an denen mehrere Rohrleitungen zusammentreffen. Aus diesem Grund stellt die Herstellung dieser Schachtunterteile, auch Schachtsammler genannt, eine besondere Aufgabe dar. Durch verschiedene anzuschließende Nenndurchmesser der ankommenden Rohrleitungen sowie durch variierende Winkel und Gefälle ist fast jedes Schachtunterteil ein Unikat. Diese Schachtunterteile werden seit Jahren aufwendig von Hand gefertigt. In Abbildung 2-22 und Abbildung 2-23 ist die manuelle Herstellung eines solchen dargestellt.



Abbildung 2-22: Manuelle Herstellung des Gerinnes eines Schachtunterteils durch händisches Formen des erdfeuchten Betons anhand einer 2D-Skizze [22]



Abbildung 2-23: Manuelle Herstellung des Gerinnes eines Schachtunterteils durch Platzieren von händisch zugeschnittenen Klinkersteinen auf einem Betonbett

Das Ausgangsprodukt eines Schachtunterteils stellt ein aus den zuvor beschriebenen Herstellprozessen für Rohre hergestellter Rohling dar, in den die Bodenplatte (Abbildung 2-22, links) eingebracht wird. Aufbauend darauf stellt ein Handwerker das benötigte Gerinne aus erdfeuchtem Beton händisch her (Abbildung 2-22 mittig, rechts) oder platziert händisch zugeschnittene Klinkersteine im Rohling (Abbildung 2-23). Diese Arbeiten sind körperlich anstrengend, da sie vorwiegend kopfüber nach unten durchgeführt werden müssen. Zudem ist die Erfahrung des ausführenden Mitarbeiters für die Qualität des Schachtunterteils von Bedeutung, da dieser anhand von 2D-Plänen das Gerinne gedanklich in ein 3D-Modell überführen und dieses händisch umsetzen muss.

Ebenfalls kann nach dem gleichen Prinzip das Schachtunterteil ausgeklinkert werden, um einen höheren Widerstand gegen aggressive Abwässer zu gewährleisten (Abbildung 2-23). Nachteilig ist die vorhandene Fuge, die zwischen dem vorproduzierten Rohling und dem später eingebrachten Gerinne entsteht. Die Dauerhaftigkeit dieses Bauwerks ist im Vergleich zu einer kompletten monolithischen Ausführungsweise schlechter. Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit Verfahren entwickelt, die monolithische und individuelle Schachtunterteile mit Hilfe von nahezu vollständig automatisierten Prozessen herstellen. Auf ein solches Verfahren wird in Kapitel 2.1.2 genauer eingegangen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass gerade bei der Herstellung von Bauteilen mit gleichen Geometrien und hohen Stückzahlen wie Betonrohren, Stahlbetonrohren und -schächten fast alle Betonfertigteilwerke mit automatisierten Herstellungsprozessen gefertigt werden. Individuelle Betonbauteile werden hingegen meist noch händisch hergestellt. Nur bei wenigen Prestigeprojekten, wie z. B. dem neuen Zollhof in Düsseldorf (Abbildung 2-12), oder bei Firmen, die die Vorteile einer Industrialisierung von Fertigungsprozessen erkannt haben, werden heutzutage auch vollautomatische Herstellungsprozesse für individuelle Betonbauteile wie Schachtunterteile angewendet.

2.1.3 Gängige Herstellungsverfahren für individualisierte Betonbauteile

2.1.3.1 Hochbau

Wie in 2.1.1 beschrieben, besteht im Hochbau vermehrt der Wunsch nach einzigartigen Betonstrukturen mit hohem Wiedererkennungswert. Um diesem Wunsch nach Unikaten gerecht zu werden, bieten verschiedene Schalungshersteller manuelle, teilmanuelle und teilautomatisierte Herstellungsverfahren an. Da es analog zu 2.1.2.1 nicht möglich ist, einen vollumfänglichen Vergleich aller am Markt verfügbaren Sonderlösungen von Schalungssystemen für Freiformbetonbauteile anzufertigen, soll in diesem Abschnitt anhand verschiedener Beispiele die Divergenz zwischen möglichem Automatisierungsgrad und individuellen 3D-Geometrien im Hochbau für Unikate beschrieben werden.

Am Beispiel des Aquatic Centers in London ist zu sehen, welcher händische Aufwand nötig ist, um individuelle 3D-Geometrien zu schalen. Die Firma Peri, ein Schalungshersteller, arbeitete bei diesem Projekt mit semi-manuell hergestellten Schalungselementen (Abbildung 2-24). Ein Laser-Cutter schneidet aus ebenen Holzwerkstoffplatten Formknaggen (Abbildung 2-24 erstes von links) heraus, die händisch zusammengesteckt das Grundgerüst der Schalung ergeben und somit als Schalungsträger für die Schalhaut fungieren. Die so hergestellten Schalungselemente (Abbildung 2-24 zweites von rechts) können im Werk mit weiteren Schalungselementen zu einer Gesamtschalung zusammengesetzt werden, um Fertigteile herzustellen oder vor Ort mit Standardschalungssystemen kombiniert zu werden.

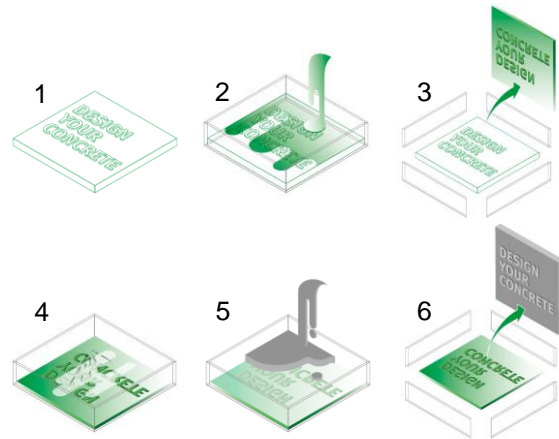


Abbildung 2-24 Semi-manuelle Fertigung eines 3D-Schalelements der Firma PERI für das Aquatics Center in London [9]

Solche semi-manuellen Herstellprozesse für Freiformschalungen werden von unterschiedlichen Herstellern angeboten. Sie unterscheiden sich zwar in den einzelnen Arbeitsschritten, den verwendeten Materialien und im möglichen Formenspektrum, haben jedoch eine Gemeinsamkeit, nämlich, dass sie nicht ohne händische Arbeiten auskommen, und dass eine Überführung aller manuellen Arbeiten in eine rein maschinelle Fertigung wirtschaftlich kaum umsetzbar ist.

Neben dem in 2.1.1 beschriebenen Herstellprozess, Styropor maschinell mittels Fräsen zu bearbeiten, gibt es noch weitere Herstellprozesse, individuelle Negativformen zu erzeugen, um Beton zu formen. Ein verbreitetes Verfahren, um z. B. die Oberfläche des Betons zu individualisieren, sind Matrizen. Diese aus Kunststoff oder Gummi bestehenden plattenförmigen Elemente werden als Schalhautersatz auf die Schalhaut von Standardschalungssystemen geklebt und geben durch ihre individuell formbare Oberfläche dem Beton seine Kontur. Die Firma Reckli nutzt ein Verfahren, bei welchem im ersten Schritt aus einem beliebigen Plattenwerkstoff ein Positiv der herzustellen Betonoberfläche maschinell, mittels Zerspanung, erzeugt wird. Mit Hilfe eines flüssigen Elastomers, das nach einer bestimmten Zeit erhärtet, wird die zuvor erzeugte Geometrie konserviert und es entsteht ein Negativ-Abdruck des Originals. Die aus Elastomer hergestellte Negativform wird im Nachgang auf die Schalhaut einer Standardschalung geklebt und dient so als formgebende Schalhaut in der Gesamtschalung. In Abbildung 2-25 ist der Herstellprozess bildlich dargestellt.

Die so hergestellten Matrizen können mehrfach verwendet werden. Nachteilig ist, dass das Elastomer nach dem Erhärten nicht recycelt werden kann und nach dem Gebrauch entsorgt werden muss. Durch die Mehrfachverwendung können zwar rechnerisch die Herstellkosten je Gebrauch gesenkt werden, gleichzeitig verringert sich aber durch die hohe Zahl gleicher Formen das Formenspektrum. Die Herstellung einer Vielzahl an unterschiedlichen Matrizen für komplette Fassaden, in denen kein Element dem anderen gleicht, ist mit diesem Verfahren unwirtschaftlich und ökologisch nicht nachhaltig.



Eine weiterer Herstellprozess für freigeformte Beton-Geometrien, der selten und nur bei Prestige-Bauwerken zum Einsatz kommt und schon in 2.1.1 beschrieben wurde, nutzt Zerspanungsprozesse, um aus expandiertem Polystyrol (EPS), Polyurethan (PU) und Vollholz Negativformen als Sonderschalungen für den Betonbau herzustellen. Dieser Prozess kann mittels CNC-gesteuerter Bearbeitungszentren oder durch Roboter vollautomatisch durchgeführt werden. Das digitale Modell des herzustellenden Betonbauteils wird an eine CAM-Software übertragen, die den gesamten Fräsprozess entwickelt, der nötig ist, um aus einem Styroporwürfel (Werkstück) die Zielgeometrie zu erhalten. In diesem Programm können die Produktionsgeschwindigkeiten, die Werkzeuge (Fräser) sowie die Bahnplanung festgelegt werden. Diese Parameter haben direkten Einfluss auf die Herstdauer und die Oberflächengüte der Negativform. In Kapitel 3.3 werden der gesamte Fräsprozess und die einstellbaren Größen beschrieben.

Abbildung 2-25 RECKLI-Matrizen-Herstellungsverfahren, (1) manuelle oder maschinelle Herstellung der Positiv-Urform aus z. B. Gips, (2) Aufbringen eines Trennwachs und Abguss der Positiv-Urform mit einem flüssigen Elastomer, (3) Nach dem Erhärtungsprozess des Elastomers kann die erzeugte Negativform entnommen werden, (4) Aufsetzen der Negativform auf die Schalhaut einer bestehenden Schalung, Aufbringen von wachsähnlichem Trennmittel, (5) Betonage der Schalung mit aufgeklebter Negativform aus Elastomer, (6) Nach dem Erhärtungsprozess des Betons entschalen des Betonbauteils [29]

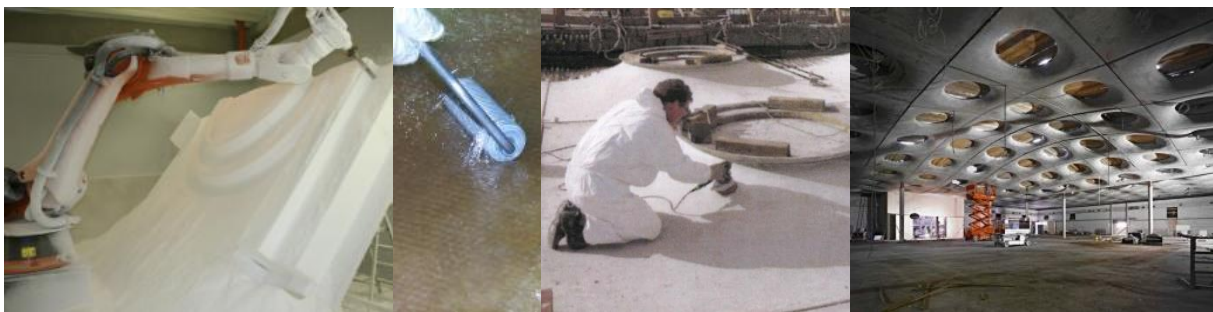


Abbildung 2-26: Städel-Museum in Frankfurt: Fräsen von EPS-Hartschaumblöcken durch die Firma Accentform Kunststoffverarbeitung [29]; Beschichtung mit 5 mm dickem Glasfaser-Kunststoff-Laminat; manuelles Nachbearbeiten der Schalung (Foto Klotz); fertige Decke des Museums (©Foto Norbert Miguletz) (v. l. n. r.)

Durch die vollautomatische Herstellung von Negativformen als Sonderschalungen für den Betonbau können komplexe Bauteilgeometrien wirtschaftlich realisiert werden. Durch den notwendigen Einsatz von Trennmittel kann das EPS nach Gebrauch nicht wiederverwendet werden und muss kostenintensiv entsorgt werden, was sich wiederum negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens auswirkt. Zum anderen ist die Festigkeit des EPS im Vergleich zu anderen Schalungsmaterialien wie Holz deutlich geringer, was sich speziell bei vertikalen Bauteilen wie Stützen etc. bedingt durch höhere Frischbetondrücke negativ auf die Maßhaltigkeit der herzustellenden Betonbauteile auswirkt. Trotz der zuvor genannten Nachteile ist dieses Verfahren das einzige derzeit am Markt verfügbare, mit dem digital und vollautomatisiert Negativformen für Sonderschalungen produziert werden können.

2.1.3.2 Tiefbau

In der Tiefbaubranche ist die Automatisierung von Produktionsprozessen weiter vorgeschritten als im Hochbausegment. Das liegt daran, dass zum einen herzustellende Produkte wie Rohre und Schächte strengen Normen unterliegen und zum anderen hohe Ansprüche an die Qualität und Langlebigkeit gestellt werden. Ein weiterer Punkt ist, dass architektonische Gestaltungsfreiheit im Tiefbau nicht gewünscht oder benötigt wird. Die Bauelemente im Tiefbau müssen zweckmäßig sein. Dies schränkt eine mögliche Geometrievielfalt ein, was zur Folge hat, dass die Fertigungsprozesse wirtschaftlicher automatisiert werden können. Zudem können nur durch eine automatisierte Fertigung dieser Produkte die hohen Anforderungen an die Qualität und Langlebigkeit gewährleistet werden, da die Bauteile meist unterirdisch eingebaut werden und ein Austausch bei Mängeln nur mit Aufwand und hohen Kosten möglich ist.

Die Herstellverfahren von Rohren und Schächten aus Beton und Stahlbeton für horizontale unterirdische Rohrleitungen sowie für vertikale Kontroll- und Revisionsschächte wurden zuvor detailliert beschreiben. Durch die geringe Geometrievielfalt werden diese Produkte heutzutage vollautomatisch hergestellt. Schachtunterteile hingegen stellen eine größere Herausforderung hinsichtlich einer vollständig automatisierten Fertigung dar. Im Gegensatz zu Freiform-Geometrien im Hochbau, die nur selten und bei Prestige-Projekten zum Einsatz kommen, sind Schachtunterteile beim Bau und der Instandhaltung von Abwasserkanälen zwingend erforderlich. Diese Bauwerke sind meist Unikate, da dort eine Vielzahl von Abwasserleitungen zusammenkommt und angeschlossen werden muss. Die Schachtunterteile dienen als Sammler von Abwasserleitungen. Sie bündeln mehrere ankommende Abwasserleitungen in eine abgehende Leitung oder dienen für die anzuschließenden Leitungen als Kontrollmöglichkeit. In Abbildung 2-22 (rechts) ist beispielhaft ein Schachtunterteil dargestellt.

Die Halbschalen, in denen das Abwasser fließt, heißen *Gerinne*. Durch unterschiedliche ankommende Leistungsdurchmesser, Gefälle und Winkel stellen diese Bauwerke fast immer ein Individualbauteil für den Einsatz an einer bestimmten Stelle dar. Bei der Planung von neuen Abwasserleitungssystemen kann zwar darauf geachtet werden, dass die Abwasserleitungen, die in einem Schachtunterteil zusammenfließen, gewisse Standards (Winkel, Durchmesser der Rohre und Gefälle) einhalten, um die Varietät der Schachtunterteile zu verringern und ggfls. auf Standardbauteile zurückgreifen zu können, jedoch müssen bei der Instandhaltung und dem Austausch defekter Schachtunterteile diese herzustellenden Schachtunterteile den örtlichen Gegebenheiten genau angepasst werden, was eine Herausforderung für den Schalungsbau darstellt. Nachfolgend werden die drei häufigsten am Markt genutzten Herstellverfahren beschrieben, die sich durch einen hohen Automatisierungsgrad auszeichnen. Manuell hergestellte Schachtunterteile werden zwar immer noch produziert, sind jedoch durch ihren hohen manuellen Aufwand im Vergleich zu den voll automatisierten Herstellverfahren in Zukunft nicht konkurrenzfähig und werden in diesem Kapitel nicht weiter betrachtet.

Herstellung von Schalungen für Schachtunterteile durch die Zerspanung von EPS

Der Herstellungsvorgang beginnt mit der Arbeit an einem 3D-Modell am Computer. Notwendige Eigenschaften für das Schachtunterteil wie Nenndurchmesser, Anzahl und Durchmesser der Zu- und Abläufe, Winkel und die Gefälle der Gerinne werden digital nach den Ansprüchen des Auftraggebers eingepflegt. Weitere normierte Eigenschaften wie die notwendigen Wandstärken liefert die Software automatisch. Das mittels der Eingaben erzeugte 3D-Modell wird an ein Bearbeitungszentrum weitergeleitet. Dieses kann hierbei sowohl aus einer Fräszelle mit einer drei- oder Fünf-Achs-Frässpindel als auch aus einem Sechs-Achs-Roboter mit Frässpindel bestehen (Abbildung 2-27, links). Im Fräsprozess wird aus einem EPS-Hartschaum-Block das zu erzeugende Negativ des Schachtunterteils hergestellt. Große Negativformen können aus mehreren gefrästen EPS-Hartschaumstücken zu einer Gesamtschalung zusammengesetzt (verklebt) werden. Da es sich bei EPS-Hartschaum um ein offenporiges Material handelt, wird im Anschluss an den Fräsprozess händisch ein Trennmittel (Abbildung 2-27, mittig) aufgetragen. Das Trennmittel schließt zum einen die Poren und dient zum anderen als Trennmittel zwischen Beton und gefräster EPS-Hartschaumoberfläche. Zum Aushärten mancher Trennmittel müssen diese mittels UV-Licht bestrahlt werden. Nach dem Erhärten

kann die Negativform aus EPS in der Schalung aus Stahl platziert werden. Diese besteht aus zwei zylindrischen Wandelementen und einem runden Bodenelement. Dort wird die Form mittels magnetischer Befestigungsanker im Zentrum der Schalung fixiert. Der Boden der Schalung kann individuell an die Produkthöhe angepasst werden (Abbildung 2-27, mittig). Nachdem die Schalung zusammengesetzt wurde, kann den Anforderungen entsprechend geeigneter Beton in die Schalung eingebracht werden. Wichtig ist, dass der verwendete Beton laut der Expositionsclassen [30–32] die Anforderungen an die Belastung durch die aggressiven Bestandteile des Abwassers erfüllt. Im Anschluss daran erhärtet das Schachtunterteil in der Schalung. [33]



Abbildung 2-27: Zerspanung eines EPS-Werkstücks, Platzieren der hergestellten und mit Trennmittel (rosa) beschichteten Negativform in der Stahlform, Nach der Entschalung fertig hergestelltes Schachtunterteil (v. l. n. r.) [34]



Abbildung 2-28: Herstellung monolithischer Abwasser-Schachtunterteile: CNC-gesteuertes Fräsen der Schalungskörper aus EPS mit dem System der B+S Peco-System, manuelles Nachschleifen der Oberfläche; Herstellung monolithischer Abwasser-Schachtunterteile: Beschichten der gefrästen EPS-Schalungskörper mit dem Trennmittel Betopro® WX-G, nach dem Abbinden der Schachtunterteile muss die EPS-Einwegschalung als Abfall entsorgt werden (v. l. n. r.) © Fotos: H. Kloft [9]

Nach der Betonage wird der Schachtunterteil entschalt. Durch das Schwinden des Betons und durch oftmals zu geringe Entschalwinkel muss beim maschinellen Entschalen häufig manuell nachgeholfen werden. Da es sich bei der Herstellung von Schachtunterteilen fast immer um Unikate handelt, kann die gebrauchte Negativform, falls diese unbeschädigt entnommen werden kann, nicht wiederverwendet werden und muss durch die notwendige Beschichtung mit Trennmittel als Sondermüll kostenintensiv entsorgt werden und kann somit nicht recycelt werden.

Ein Vorteil dieses Herstellprozesses ist, dass das gesamte Schachtunterteil aus einem Guss, sprich monolithisch, hergestellt werden kann. Im Vergleich zu den manuell hergestellten Schachtunterteilen besitzen diese monolithischen Schachtunterteile keine Fugen mehr, in die mit der Zeit Abwässer eindringen und so das Bauteil beschädigen können. Hierdurch wird die Langlebigkeit gesteigert. Zudem ist es mit diesem Verfahren erstmals möglich, die Herstellung von individuellen Schachtunterteilen fast komplett automatisiert und wirtschaftlicher zu gestalten. Die Fräsdauer für eine Negativform eines Schachtunterteils beträgt ca. 30 bis 45 Minuten und stellt somit im Vergleich zu den manuellen Herstellprozessen für Schachtunterteile nicht nur eine Alternative, sondern eine konsequente Weiterentwicklung dar. Nachteilig sind der enorme Verbrauch an EPS-Hartschaum und die damit einhergehende Produktion von Sondermüll. Laut Aussage der Firma B+S Engineering GmbH produziert eine Firma, die sich auf die Herstellung von Schachtunterteilen mittels Zerspanung von EPS-Hartschaum fokussiert hat, rund 200 Schachtunterteile pro Woche. Somit erzeugt ein Werk jede Woche alleine rund 200 m³ Sondermüll in Form von nicht recycelfähigem EPS. Durch den geringen Kaufpreis von EPS ist dieses Verfahren derzeit zwar wirtschaftlich, jedoch ökologisch nicht sinnvoll und erfüllt somit in keiner Weise den immer stärker in den Vordergrund tretenden Gedanken von Nachhaltigkeit in der heutigen Gesellschaft.

Schachtsanierung mit Inlays aus Kunststoff (Polyurethan – PUR)

Aufbauend auf den Möglichkeiten, beliebige Schachtunterteil-Geometrien mittels Zerspanung zielführend herstellen zu können, reicht es für manche Abwässer und die darin enthaltenen aggressiven Bestandteile nicht aus, das Schachtunterteil in monolithischer Ausführung aus reinem Beton herzustellen, um eine dauerhafte Dichtigkeit und somit Langlebigkeit zu gewährleisten.

Um den Beton vor aggressiven Abwässern zu schützen, existiert der Ansatz, diesen mit PUR-Kunststoff (Polyurethan) zu beschichten, um einen dauerhaften Schutz im Bereich der wasserführenden Oberfläche zu gewährleisten. Dieser Kunststoff ist in hohem Maße resistent gegen angreifende Mineralsäuren, Basen und Salzlösungen. Im ersten Schritt gleicht dieses Herstellverfahren dem zuvor beschriebenen Verfahren. EPS-Hartschaum wird gefräst, jedoch wird die gefräste Oberfläche zusätzlich neben dem Trennmittel mit PUR-Kunststoff beschichtet (Abbildung 2-29 rechts). Die Beschichtung erfolgt mit einem speziellen und automatischen Spritzverfahren. Durch eine strukturierte Oberfläche (Abbildung 2-29 rechts) verankert sich der PUR-Kunststoff nach der Betonage im erhärteten Beton. Der formgebende EPS-Hartschaum wird im Anschluss aus der Form entnommen und die dünne Schicht PUR-Kunststoff verbleibt auf dem Beton und bildet die wasserführende Oberfläche des Schachtunterteils.



Abbildung 2-29: Mittels Zerspanung von EPS hergestellte Negativform, die im Nachgang erst mit Trennmittel (rosa) und im Anschluss mit einer PUR-Beschichtung beschichtet wird, die nach der Betonage im Beton verbleibt; hergestelltes Schachtunterteil mit PUR-Kunststoff-Oberfläche (v. l. n. r.)

Dieser Herstellprozess kann zudem auch zur Sanierung von bestehenden Kanalsystemen genutzt werden. Hierfür muss zunächst die schadhafte Oberfläche des vorhandenen Schachtbodens abgetragen werden. Das schadhafte Gerinne wird vor Ort vermessen und digitalisiert. Die Negativschalung wird, wie zuvor beschrieben, aus gefrästem EPS-Hartschaum hergestellt und sowohl mit Trennmittel als auch mit PUR-Kunststoff beschichtet. Die PUR-Kunststoffschicht wird im Nachgang vom EPS-Hartschaum abgezogen und in den schadhafte Schachtunterteil eingesetzt. Für eine dauerhafte Verbindung wird das neue PUR-Kunststoffgerinne mit Schnellvergussmörtel vergossen.



Abbildung 2-30: Ausführung einer Schachtsanierung: zu sanierendes Schachtunterteil, hergestelltes, individuelles Inlay aus PUR-Kunststoff, saniertes Schachtunterteil mit PUR-Kunststoff-Oberfläche (v. l. n. r.) [35]

Vorteile bietet dieses Verfahren, wie zuvor beschrieben, aufgrund des hohen Automatisierungsgrads und der gesteigerten Resistenz gegen aggressive Abwässer durch die PUR-Kunststoffbeschichtung der Gerinne. Zudem ist dieses Verfahren in der Lage, sanierungsbedürftige Schachtunterteile kostengünstig und ohne den kompletten Austausch des Schachts instand zu setzen. Nachteilig sind jedoch wiederum die hohen Entsorgungskosten des anfallenden Sondermülls in Form von EPS-Hartschaum.

Herstellung von Schachtunterteilen durch Zerspanung von Beton

Mit einem neuartigen Herstellprozess wird das Ziel verfolgt, auf Schalungen für die Herstellung von individuellen Schachtunterteilen zu verzichten und stattdessen aus einem großen, massiven Beton-Zylinder die benötigte Geometrie vollautomatisch heraus zu fräsen.

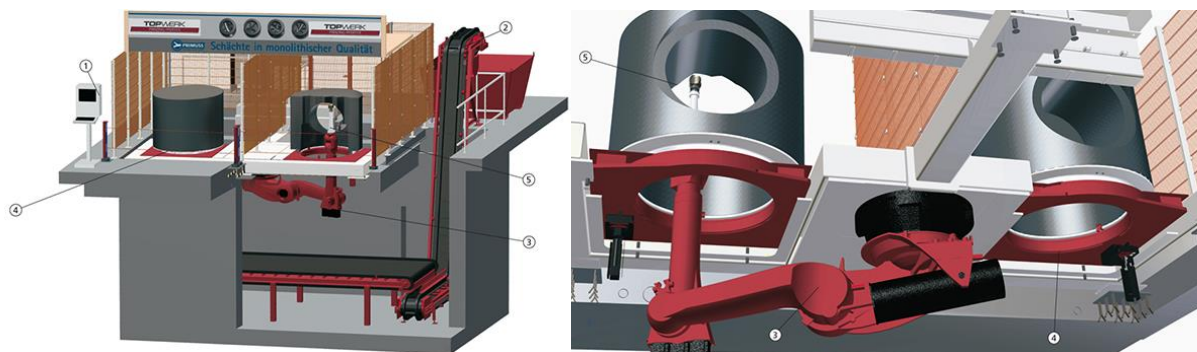


Abbildung 2-31: Schematische Darstellung der Fertigungsanlage zur Zerspanung von Beton mittels eines Roboters mit Spindel; (1) Steuerpult, (2) Förderband, Fräsgut, (3) Industrieroboter, (4) Frässtation mit Frästisch, (5)Fräser. [36]

Im Herstellungsprozess wird zunächst ein monolithischer Schachtrohling in Form eines Zylinders aus Beton gepresst. Dies geschieht außerhalb des eigentlichen Bearbeitungszentrums und bedarf zusätzlicher Maschinen. Wichtig bei diesem Herstellprozess ist eine spezielle auf diesen Prozess angepasste Betonrezeptur. Für dieses Verfahren kommt ein Beton mit steifer Konsistenz zum Einsatz. Nach dem Pressen der Betonmasse zu einem Zylinder muss die Betonrezeptur so eingestellt sein, dass der Beton zum einen eine gewisse Grünstandfestigkeit besitzt, um eine ausreichende Formstabilität zu gewährleisten und zum anderen noch so *weich* ist, dass er zielführend und ohne erhöhten maschinellen Einsatz wirtschaftlich gefräst werden kann.

Der Rohling wird im nächsten Schritt auf der Frässtation positioniert, sodass ihn ein Spezial-Fräser von der Unterseite als auch seitlich bearbeiten kann. Das anfallende Fräsgut (abgetragenes Betonmaterial) fällt auf ein Förderband und muss umgehend wiederverwertet werden, da der Beton nach der Erhärtung nicht mehr verwendbar ist. Eine Unterbrechung dieses Prozesses bedeutet die sofortige Produktion von Abfall in Form von erhärtetem Beton und wirkt sich unverzüglich negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtverfahrens aus. Durch den Einsatz eines Fräs-Roboters wird ein hohes Maß an Formfreiheit erreicht, jedoch kommt es durch das Fräsen des noch frischen Betons zu Ausbrüchen an den Kanten

der Anschlüsse, die dadurch eine manuelle Nachbehandlung benötigen. Über die Produktionsdauer eines Schachtunterteils sind keine Daten vorhanden.

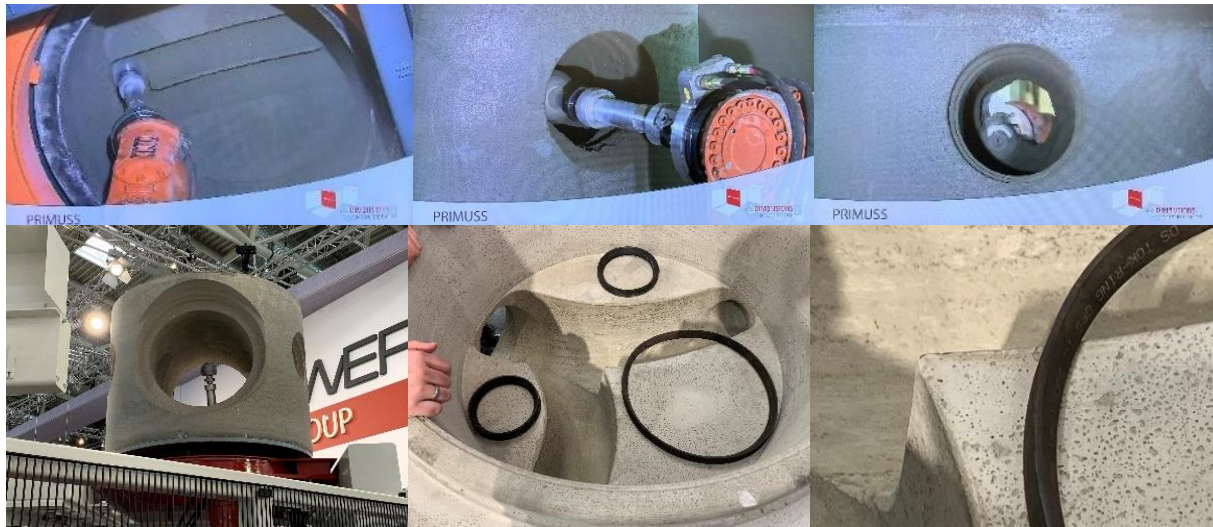


Abbildung 2-32: Zerspanende Bearbeitung des sehr steifen Betons von unten und seitlich (obere Bildhälfte), Hergestelltes Schachtunterteils und Darstellung der Oberflächenqualität (untere Bildhälfte)

Dieses Verfahren soll in der Lage sein, ohne die Produktion von Abfall individuelle Schachtunterteile herzustellen. Um die Wirtschaftlichkeit dieses Herstellprozesses sicherzustellen, ist es zwingend erforderlich, die große Menge an abgetragenem Betonmaterial (Fräsgut) wieder zurück in den Produktionsprozess zu führen. Nach Aussage der Herstellerfirma wird dieses jedoch nicht in den Produktionsprozess zurückgeführt, sondern als Füllmaterial im Straßenbau weiterverkauft. Gründe hierfür sind, dass die Hersteller aus Qualitätsgründen das Material, das den Produktionsprozess einmal durchlaufen hat und schon zwei bis drei Stunden alt ist (schon zum Teil erhärtet), nicht mit neuem Betonmaterial mischen. Nur wenn im Prozess dauerhaft neues Material zum Einsatz kommt, können die Anforderungen hinsichtlich Qualität und Langlebigkeit gewährleistet werden. Die Tatsache, dass das abgetragene Betonmaterial nicht in den Produktionsprozess zurückgeführt wird, macht diesen Herstellprozess im Vergleich zu anderen Verfahren unwirtschaftlich.

Ein weiterer Nachteil liegt in der Betonrezeptur. Um einen frühzeitig formstabilen und nicht flüssigen Beton zu erhalten, wird Beton mit steifer Konsistenz benötigt. Das hat zur Folge, dass das Betongefüge porös ist (Abbildung 2-32 rechts).

Diese Porosität stellt einen Nachteil bezüglich der Dauerhaftigkeit des Schachtunterteils dar, da sich in den Poren Schmutz und andere Verunreinigungen absetzen und das Bauteil dauerhaft schädigen. Bei den zuvor beschriebenen Herstellprozessen sind die Dichtungen für die anzuschließenden Rohrleitungen schon in der Negativform eingesetzt und werden mit einbetoniert. Hierdurch wird ein bestmöglicher Verbund gewährleistet. Bei diesem Herstellprozess müssen die Dichtungen anschließend manuell eingeklebt werden (Abbildung 2-32 mittig). Zum einen stellt diese manuelle Tätigkeit im sonst vollautomatischen Produktionsprozess eine Störung dar und zum anderen leidet wiederum die Dauerhaftigkeit des Schachtunterteils darunter, da sich der Klebstoff mit der Zeit lösen kann.

Es kann zudem keine Aussage über die Abnutzung der Fräswerkzeuge bei der Zerspanung von Beton getroffen werden. Nur wenn die Fräswerkzeuge keinen größeren Verschleiß (hohe Standzeiten) während des Fräsprozesses aufweisen, ist dieses Herstellungsverfahren wirtschaftlich und die so hergestellten Betonbauteile maßhaltig. Der Autor dieser Arbeit geht jedoch davon aus, dass bei der Zerspanung von Beton hoher Verschleiß an den Schneiden der Fräswerkzeuge auftritt, was sich zum einen auf die Wirtschaftlichkeit und zum anderen auf die Maßhaltigkeit der herzustellenden Betonbauteile auswirkt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in den letzten Jahren zwar zum Teil innovative Entwicklungen hinsichtlich eines vollständig automatisierten Herstellprozesses für individuelle Betonbauteile stattgefunden haben. Jedoch sind diese Entwicklungen entweder wirtschaftlich nicht sinnvoll und liefern zudem nicht die angestrebte Qualität (Zerspanung von steifem Beton) oder die Verfahren sind zwar wirtschaftlich zielführend, produzieren jedoch enorm viel Abfall und sind in Zukunft durch die hohe Innovationskraft der Branche kaum konkurrenzfähig (Zerspanung von EPS).

2.2 Potenziale einer automatisierten und individuellen Fertigung

Der Anteil der Rohbaukosten an den Gesamtkosten eines Bauwerks beträgt ca. 50 %. Die gesamten Rohbaukosten (50 % der Gesamtkosten) teilen sich wiederum in 50 % Lohn-/Geräteanteil und 50 % Materialanteil auf. [37] Mit der Überführung der meist händischen Produktion von Betonbauteilen auf der Baustelle in einen automatisierten Fertigungsprozess im Werk können die Baukosten reduziert werden. Eine Untersuchung von Boenert und Blömeke [38] zeigt, dass bei Hochbaustellen ein Arbeiter nur während rund 31 % seiner Arbeitszeit auch seiner Haupttätigkeit nachkommt (Abbildung 2-33). Die restliche Zeit wird für die Materialsuche, das Aufräumen, das Umräumen und das Transportieren sowie für Arbeitsunterbrechungen aufgrund von Schlechtwetter vergeudet.

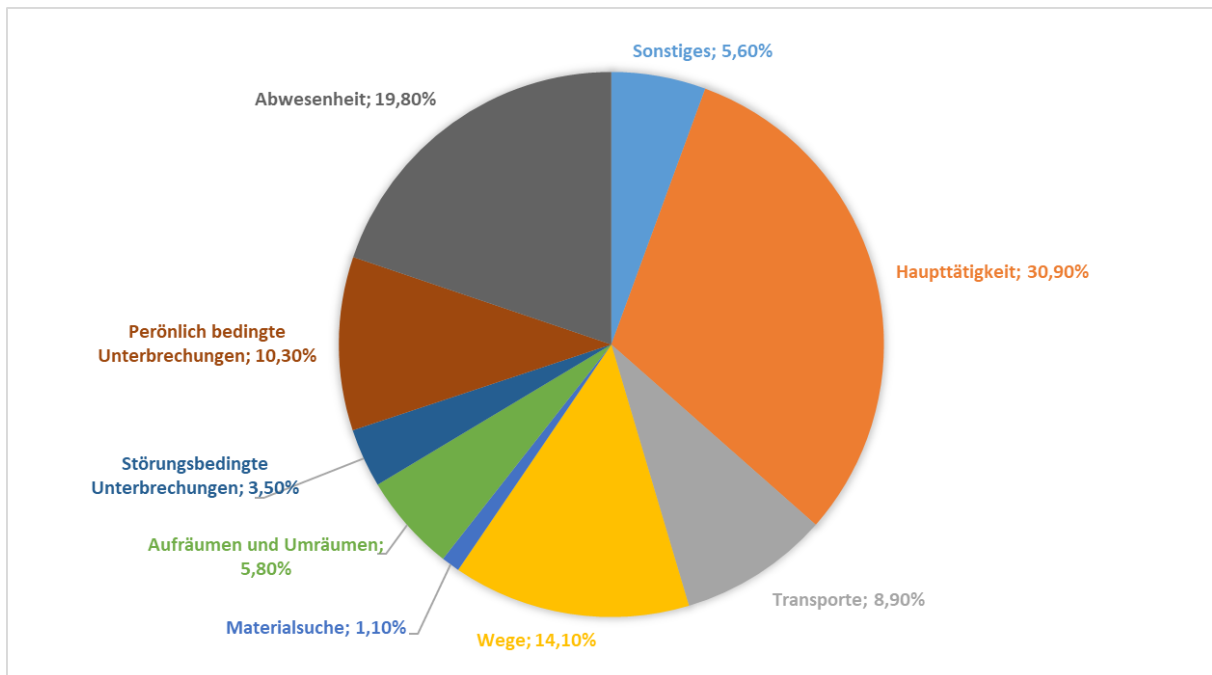


Abbildung 2-33: Anteile der Tätigkeit gemessen an der Gesamtzeit des Ausbaus [38]

Dieser Punkt allein rechtfertigt die Notwendigkeit von automatisierten Fertigungen im Betonbauwesen. In Abbildung 2-34 ist jedoch zu sehen, dass der Markt der Fertigteilindustrie (Orange) seit 1991 stagniert. Es stellt sich die Frage, weshalb trotz dieser unproduktiven Arbeitsweise vor Ort heutzutage immer noch Bautätigkeiten auf Baustellen manuell ausgeführt und Betonbauteile in Ortbetonbauweise händisch hergestellt werden und warum produzierte Fertigteile nicht schon längst Ortbetonbauteile überholt hat. Eine Ursache hierfür stellen Billiglöhne aus Niedriglohnländern dar. Durch diese Billiglöhne ist eine solch unproduktive händische Herstellungsweise von Betonbauteilen vor Ort immer noch wirtschaftlich tragbar. Jedoch kann erwartet werden, dass Billiglöhne in naher Zukunft steigen und dadurch die Bedeutung einer automatisierten Fertigung und speziell einer Vorfertigung von Betonbauteilen zunimmt. [39]

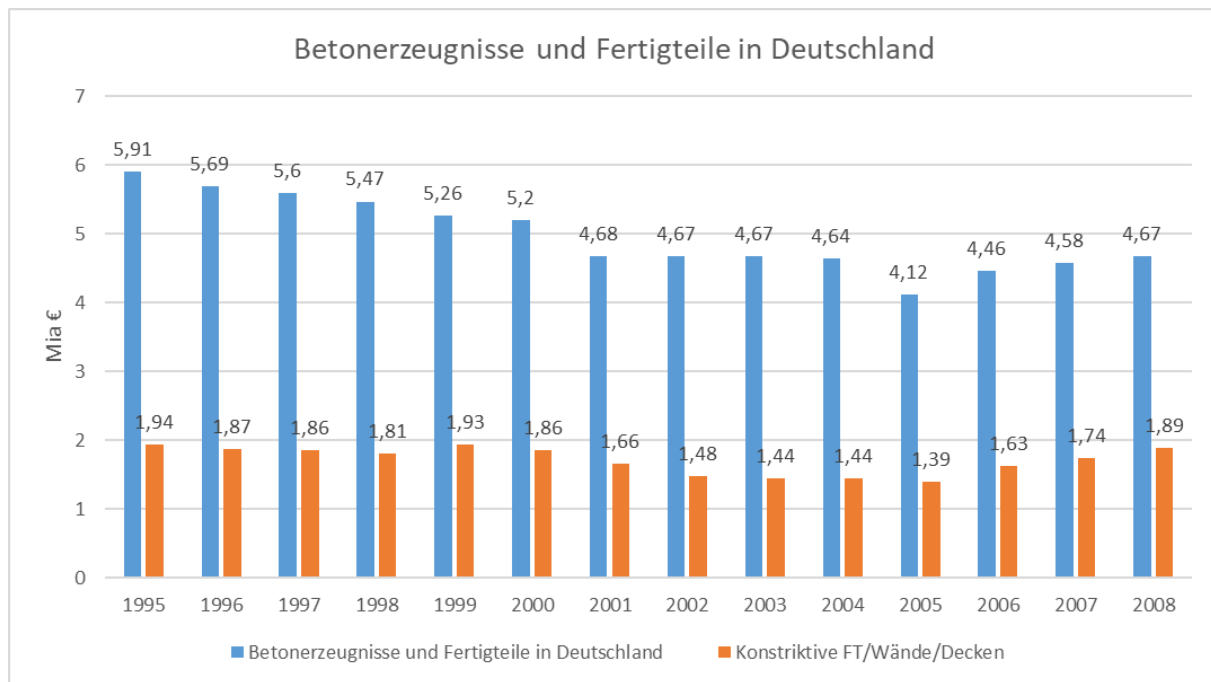


Abbildung 2-34: Betonzeugnisse und Fertigteile in Deutschland; Betonzeugnisse insgesamt gegenüber großformatigen Fertigteilen [40]

Das wirft die Frage auf, welche Ansätze es gibt, um aus einem händischen Produktionsprozess einen automatisierten Prozess zu entwickeln.

Die Produktion von Betonbauteilen muss zentral stattfinden, sprich, die Betonbauteile müssen im Werk vorproduziert werden. Nur im Werk können manuelle Arbeiten durch Maschinen und Roboter automatisiert ausgeführt werden. Speziell monotone, einfache oder immer wiederkehrende Arbeiten könnten werkseitig durch Roboter kostengünstiger und mit gleichbleibend hoher Qualität durchgeführt werden. Die konstante Qualität ist auf die Präzision eines Roboters zurückzuführen, die im Vergleich zum Menschen besser sowie konstant über den gesamten Produktionszeitraum ist. Eine automatisierte Produktion und deren Wirtschaftlichkeit hängen von der Stückzahl der herzustellenden Bauteile ab. Je häufiger ein Bauteil gleicher oder ähnlicher Geometrie produziert wird, desto kostengünstiger kann dieses Bauteil veräußert werden. Aus dem zuvor genannten Punkt lässt sich ableiten, dass die Fertigung von Betonbauteilen standardisiert werden muss, um einen wirtschaftlichen Vorteil zu generieren. Trotzdem muss eine gewisse Flexibilität gewährleistet werden, um unterschiedlichen Gestaltungswünschen und Ansprüchen der Kunden nachkommen zu können.

Das Ziel der Industrialisierung von Produktionsprozessen ist somit, ein Produkt schneller oder billiger oder besser herzustellen, wobei nur eines der drei zuvor genannten Ziele heutzutage erreicht werden muss, um einen Produktionsprozess zu industrialisieren. Werden alle drei Ziele gleichzeitig erfüllt, würde dies das Optimum für einen Produktionsprozess darstellen. [40] Im nächsten Schritt werden die Vor- und Nachteile einer automatisierten Produktion von Betonbauteilen zusammengefasst dargestellt:

Vorteile

- Verkürzte Bauzeit

Beim Bau mit Fertigteilen können im Werk gleichzeitig Bauteile wie Wände und Decken hergestellt werden. Zeitgleich können auf der Baustelle die Fundamente betoniert werden. Durch diese Vorproduktion von Betonbauteilen ist es im Werk möglich, die Bauteile, die bei einer Ausführung vor Ort gegenseitige Abhängigkeit erzeugen (z. B.: Herstellung der Decke erst möglich, wenn Wände hergestellt wurden), zeitgleich herzustellen. Diese Abhängigkeit von Bauteilen bei der Herstellung vor Ort kann durch eine Vorfertigung vermieden werden. Zudem ist die Produktion nicht und die Montage kaum witterungsabhängig, sodass die Produktion sowie die Montage auch im Winter problemlos durchgeführt werden können. Bei einer werkseitigen und automatisierten Vorfertigung von Betonbauteilen können

z. B. die Dämmung und die TGA-Installationen direkt im Bauteil integriert werden. Ein weiterer Vorteil ist nicht nur eine verkürzte, sondern auch eine besser planbare Bauzeit. Durch die Vorproduktion der Bauteile im Werk und die reine Montage auf der Baustelle kann der Fertigstellungstermin einfacher eingehalten werden, was sich wiederum auf die Einsparung von Finanzierungskosten sowie auf frühzeitige Nutzungseinträge positiv auswirkt.

- Qualitätsverbesserung

Durch die Produktion von Betonbauteilen im Werk lassen sich bessere Arbeitsbedingungen als bei der Herstellung von Betonbauteilen vor Ort schaffen. Diese wirken sich nicht nur auf die gesteigerte Produktivität, sondern gleichzeitig auch auf die Qualität aus. Die Steigerung der Qualität der Betonbauteile im Fertigteilwerk im Vergleich zur Ortbetonbauweise lässt sich auch auf eine gleichbleibende Betonqualität zurückführen, die nur im Fertigteilwerk gewährleistet werden kann. Bei der Produktion im Werk können Arbeiten, die auf der Baustelle händisch durchgeführt werden, von Maschinen und Robotern übernommen werden. Durch deren hohe Wiederholgenauigkeit von Bewegungsabläufen sind Maschinen und Roboter in der Lage, wiederkehrende Tätigkeiten genauer und dauerhaft fehlerfrei durchzuführen.

Ein weiterer Vorteil hinsichtlich der Qualitätsverbesserung wird in Form der Maßhaltigkeit, sprich der Maßabweichung zwischen dem digitalen Modell und dem hergestellten Betonbauteil, durch eine maschinelle oder robotische vollautomatisierte Herstellung von Betonbauteilen erzielt. Durch den Wegfall der Meisterpflicht in vielen am Bau vertretenen Gewerken im Jahr 2004, den derzeit herrschenden Fachkräftemangel und durch die gleichzeitig jedoch immer komplexer werdenden Anforderungen an die herzustellenden Bauteile durch z. B. die Energieeinsparverordnung zeigt sich ein Anstieg von Baumängeln in den letzten Jahren. Das Institut für Bauforschung e. V. hat 2015 eine *Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenskosten* im Auftrag des Bauherren-Schutzbunds e. V. durchgeführt. In Abbildung 2-35 ist die Entwicklung der Bauschäden zwischen 2002 und 2013 dargestellt. Diese Grafik basiert auf den von der AIA AG gemeldeten Berufshaftpflichtschäden, die eingetretene Bauschäden reguliert haben.

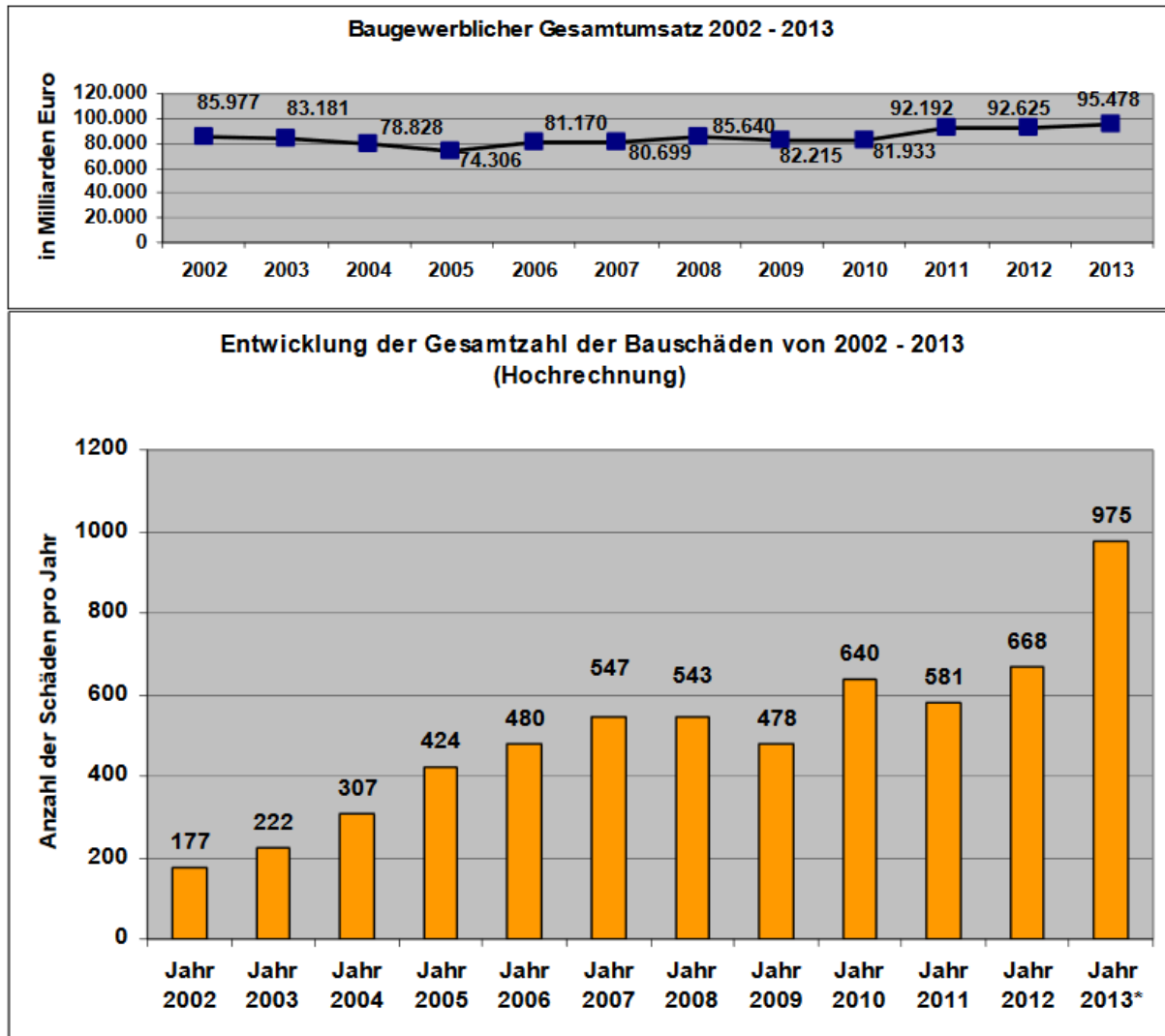


Abbildung 2-35: Baugewerblicher Gesamtumsatz zwischen 2002 und 2013 (oben), Entwicklung der Gesamtzahl der Bauschäden von 2002 bis 2013, *Hochrechnung für das Jahr 2013 (unten) [41]

Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass trotz stagnierenden Umsatzes im Baugewerbe die Zahl der Bauschäden zunimmt. Das ist darauf zurückzuführen, dass durch den Fachkräftemangel eine hohe Zahl ungelernter Hilfsarbeiter im Baugewerbe tätig ist. Die Tatsache, dass eine Vielzahl von ungelernten Hilfsarbeitern immer kompliziertere und komplexere Bauteile vor Ort herstellen soll und das meist unter hohem Termindruck, ist ein Grund für die hohe Fehleranfälligkeit und die daraus resultierenden Baumängel vor Ort.

Produktionsbedingt und durch Einflüsse wie Schwinden entstehen geometrische Maßabweichungen zwischen der Soll-Geometrie und dem hergestellten Bauteil. Liegen diese punktuellen Maßabweichungen in den zuvor definierten Toleranzen, gelten die hergestellten Bauteile als präzise und können für deren vorgesehenen Zweck verwendet werden. Werden die festgelegten Toleranzen überschritten, liegt ein Mangel vor. Laut [42] wird der Begriff *Toleranz* wie folgt definiert:

„Formelemente für Bauteile haben immer Maße und eine geometrische Gestalt. Wegen der Maßabweichungen und der Abweichungen von den geometrischen Eigenschaften (Form, Richtung und Lage) sind für die Funktion des Bauteiles Toleranzen erforderlich; werden sie überschritten, dann wird die Funktion beeinträchtigt.“

Durch eine maschinelle oder robotische vollautomatisierte Herstellung im Werk lassen sich wesentlich präzisere Betonbauteile herstellen. Das liegt zum einen an den immer gleichen Umgebungsbedingungen wie der Temperatur und der Frischbetonzusammensetzung, einer präzisen

Schalungstechnik, einer dauerhaft präzisen Ausführung der Teilprozesse durch Roboter oder Maschinen sowie einer optimalen Nachbehandlung der hergestellten Betonbauteile. In den Normen DIN 18202 – *Toleranzen im Hochbau* [12] und DIN EN 13369 – *Allgemeine Regeln für Betonfertigteile* [43] werden Grenzen für die maximalen Maßabweichungen im Hochbau festgelegt. Diese liegen bezogen auf die Gesamtlänge des Bauteils bei zwischen $\pm 10\text{mm}$ bis $\pm 40\text{mm}$. Diese Maßabweichungen sind auf die Herstellung bezogen. Zeit- und lastabhängige Verformungen spiegeln sich in diesen Angaben nicht wider. In den zuvor genannten Normen werden auch Maßabweichungen bezüglich der Querschnittsmaße etc. festgelegt, auf die nicht weiter eingegangen wird.

Zudem setzt eine reine Montage von vorgefertigten Betonbauteilen vor Ort zwingend eine präzise Vorfertigung dieser Bauteile voraus, um einen reibungslosen Aufbau zu ermöglichen. Diese Präzision kann anhand der zuvor beschriebenen Normen mit Maßabweichungen im Zentimeterbereich nur bedingt gewährleistet werden. 1977 wurde von Tiltmann die Abhängigkeit zwischen hohen Präzisionsanforderungen (kleiner werdende Toleranzen) und steigendem Kostenzuwachs beschrieben. In Abbildung 2-36 ist der Kostenzuwachs bezüglich der Toleranzen dargestellt.

Ein rein maschineller oder robotischer und vollautomatisierter Herstellungsprozess kann diese Abhängigkeit zwischen Präzision und Herstellkosten beenden und so in Zukunft gleichzeitig wirtschaftlich, mängelfrei und hochpräzise komplexe Betonbauteile herstellen.

- Verringerung der Herstellkosten

Durch den Einsatz von Schalungen, die bei Werkfertigungen mehrfach verwendet werden, können die Schalungskosten reduziert werden. Die Seriengröße der herzustellenden Betonbauteile hat hierbei direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Gerüstkosten reduzieren sich durch eine Produktion von Fertigteilen im Werk auf ein Minimum. In manchen Fällen entfallen diese Kosten komplett. Wie zuvor erwähnt, können durch den Einsatz von Maschinen und Robotern im Werk Arbeitsstunden der Mitarbeiter eingespart werden. Maschinen und Roboter können bis auf Wartungsunterbrechungen 24 Stunden sieben Tage die Woche betrieben werden, ohne Qualitätseinbußen in Kauf nehmen zu müssen, was wiederum die Herstellkosten senkt.

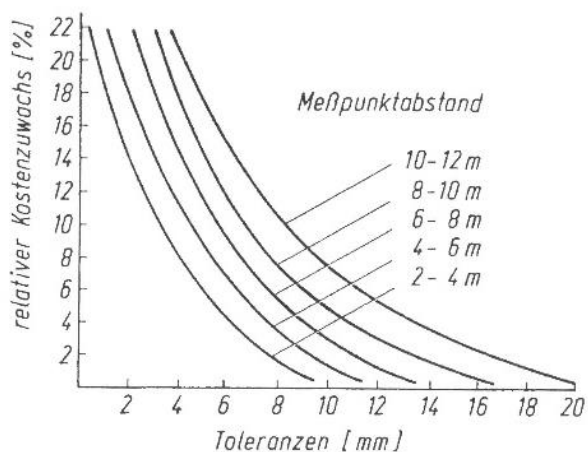


Abbildung 2-36: Kosten horizontaler Bauwerkstoleranzen [44]

Durch den Gebrauch von speziellen Schalungsformen/-geometrien kann zudem Material eingespart werden. Auf der Baustelle ist es schwierig, andere Formen als Rechteckformen herzustellen. Im Werk können durch den Gebrauch von speziellen Schalungssystemen Querschnitte wie TT- und T-Querschnitte kostengünstig produziert werden. Bei Unterzügen und Deckensystemen wird durch den Einsatz dieser Querschnitte im Vergleich zu Rechteckquerschnitten eine deutliche Materialeinsparung realisiert. Mit Hilfe eines automatisierten Prozesses und der Möglichkeiten der heutigen Computertechnik wird es in Zukunft möglich sein, Bauteile auf deren speziellen Einsatz hin zu optimieren. Durch eine Topologieoptimierung besteht die Möglichkeit, aus einem zur Verfügung stehenden Bauraum/-volumen für ein Bauteil und aus den festzulegenden Randbedingungen ein für einen speziellen Einsatz optimiertes Bauteil zu erzeugen. Bei diesem Optimierungsprozess wird Material an Stellen mit hoher Belastung angelagert und Material an Stellen mit geringer Belastung entfernt. Eine zuvor festgelegte Zielfunktion (z. B. möglichst geringes Gewicht oder Begrenzung der maximalen Spannungen etc.) und die Wahl des Optimierungsalgorithmus geben die Rahmenbedingungen für eine zielführende Topologieoptimierung vor. In Abbildung 2-37 ist eine Variante einer Topologieoptimierung dargestellt. Das optimierte Bauteil besitzt die gleichen Steifigkeiten wie das Ausgangsmodell, jedoch konnten durch die Topologieoptimierung mehr als 75 % an Material eingespart werden. Wie zuvor beschrieben, wird bei einer Topologieoptimierung nur dort Material

vorgesehen, wo hohe Belastungen herrschen. Aus diesem Grund ist eine präzise und maßhaltige Herstellungsmethode für so hoch ausgenutzte Bauteile zwingend erforderlich. Die Herstellung von topologieoptimierten Bauteilgeometrien bei gleichzeitiger Einsparung von bis zu 75 % Material kann aus den zuvor genannten Gründen nur durch einen automatisierten und maschinellen oder robotischen Herstellungsprozess zielführend durchgeführt werden. Trotzdem darf bei einer solchen Topologieoptimierung die angedachte Nutzung des Bauteils und des gesamten Bauwerks durch den Nutzer nicht beeinträchtigt werden. [44]

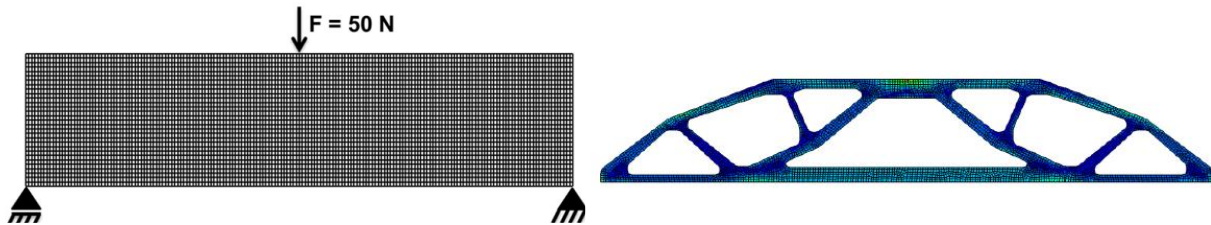


Abbildung 2-37: Ausgangsmodell eines Balkens mit Rechteckquerschnitt unter Einzellast, mögliche Variante einer Topologieoptimierung (v. l. n. r.) [44]

Nachteile:

- Höherer Planungsaufwand

Durch eine mögliche Vorproduktion von Betonbauteilen im Werk verschieben sich die Verhältnisse der durchzuführenden Arbeiten. Zwar werden bei einem automatisierten und maschinellen oder robotischen Herstellungsverfahren von Betonbauteilen Zeit und somit Arbeitsaufwand eingespart, das bedingt jedoch, dass die Planung, die Arbeitsvorbereitung und die Konstruktion an Wichtigkeit gewinnen und dafür mehr Zeit investiert werden muss.

- Spätere Änderungen nur bedingt umsetzbar

Durch eine Vorproduktion von Betonbauteilen verkürzt sich die Bauzeit. Das hat jedoch zur Folge, dass Änderungen jeglicher Art nach der Produktion der Bauteile und während der Bauzeit (Montage der Fertigteile vor Ort) kaum noch umsetzbar sind. Zudem ist eine Änderung der Belastungssituation des Gesamtbauwerks oder der einzelnen Bauteile nur schwer realisierbar. Wie zuvor erwähnt ist es wichtig, im Planungsprozess frühzeitig alle am Projekt beteiligten Gewerke zusammenzuführen, um eine detaillierte Abstimmung zwischen allen Projektbeteiligten zu ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Vorteile einer automatisierten Produktion im Vergleich zu den Nachteilen überwiegen. Einer gesteigerten Qualität bei verringerten Herstellungskosten und einer gleichzeitigen Verkürzung der Bauzeit steht lediglich ein frühzeitiger und umfänglicher Planungsprozess aller am Bau beteiligten Personen entgegen. Zudem stellen die zuvor genannten Nachteile bei genauerer Betrachtung keine Nachteile dar. Eine frühe und umfassende Zusammenarbeit und Abstimmung der Projektbeteiligten sind für jeden Bauprozess und die damit einhergehende Bauausführung von Bedeutung, da auch der Bauverlauf von Bauwerken, die in Ortbetonbauweise hergestellt werden, von einer frühzeitigen Abstimmung der Projektbeteiligten profitiert. In Abbildung 2-38 wird der Einfluss des Verhältnisses zwischen Planungsaufwand und Bauzeit bezogen auf die Gesamtzeit eines herzustellenden Bauobjekts deutlich.



Abbildung 2-38: Auswirkungen der Planungszeit auf die Gesamtzeit (Verfasser unbekannt)

Ziel der automatisierten Fertigung im Bauwesen ist eine vollkommen autonome Produktion von Betonbauteilen, ähnlich der Herstellung von Kraftfahrzeugen (Abbildung 2-39).



Abbildung 2-39: Darstellung der vollkommen autonomen Serienproduktion des Chassis eines PKWs [45]

2.3 ConFormWax als Schalungsmaterial

Aus dem Bedarf heraus, ein zu 100 % recycelbares Schalungsmaterial zu entwickeln, das es ermöglicht, maschinengesteuert Geometrienegative herzustellen, die als Außenschalung für Beton dienen sollen, wurde am ITE durch Mainka ein Grundlagenforschungsprojekt mit dem Titel *Non-Waste-Wachsschalungen* bearbeitet. In diesem wurden mit Hilfe von flüssigem Wachs kleinformatige Wachsböcke gegossen, die im Nachgang maschinell zerspannt wurden, um Geometrienegative als Betonschalungen zu erzeugen (Abbildung 1-1).

Anhand 29 verschiedener Industrie-Wachse wurde ein Wachs entwickelt, das die zuvor festgelegten Zielparameter erfüllt. Das Resultat trägt den Namen *ConFormWax*, kurz CFW. Die Forschungsergebnisse sind in der Dissertation von Mainka [9] zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Grundlagenforschung zum Thema Non-Waste-Wachsschalungen haben gezeigt, dass der Einsatz des CFW als Schalungsmaterial für Freiformbetonbauteile Vorteile im Vergleich zu z. B. handelsüblichem Styropor bietet. Durch dessen Einsatz als Schalungsmaterial konnte erstmals ein geschlossener Materialkreislauf entwickelt werden, der es erlaubt, das gesamte Schalungsmaterial zu 100 % in den Produktionsprozess zurückzuführen und somit keinerlei Abfall zu produzieren. Zudem bietet der Einsatz von Wachs als Schalungsmaterial Vorteile hinsichtlich gesteigerter Materialfestigkeiten, gleichzeitig gute Zerspanungseigenschaften und höhere Präzision im Vergleich zu Styropor. Durch den Einsatz von CFW als Schalungsmaterial lassen sich hochpräzise, formstabile und zu 100 % rezyklierbare Schalungen für den Betonbau herstellen. Jedoch stehen im Rahmen der Grundlagenforschung den schon genannten Vorteilen noch einige Nachteile gegenüber. In Tabelle 2-1 werden die Vor- und Nachteile der von Mainka entwickelten Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auf Basis von flüssigem CFW gegenübergestellt.

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile der von Mainka entwickelten Non-Waste-Wachsschalungstechnologie

Vor- und Nachteile der von Mainka entwickelten Non-Waste-Wachsschalungstechnologie	
Vorteile	Nachteile
Hohe Präzision sehr hohe Recyclingquote gut fräsbearbeitbar hohe Widerstandskraft	hoher Energieaufwand lange Abkühlzeiten innere Spannungen

Durch das Gießen von flüssigem Wachs in Abkühlformen muss das Wachs zuvor erhitzt werden, um es zu verflüssigen. Dieser erhöhte Energieaufwand hat Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtverfahrens und mindert diese. Zudem muss der Wachsblock je nach Größe nach dem Guss mehrere Stunden bzw. Tage abkühlen. Um einen konstanten und durchgängigen Produktionsprozess sicherzustellen, müssen durch die zeitliche Verzögerung des Abkühlprozesses eine Vielzahl von Wachsböcken vorgehalten werden. Durch diese Vorhaltung von Wachsböcken kann nicht *just in time* produziert werden und kurzfristige Kundenwünsche können nur schwer realisiert werden.

Während des Erstarrungsprozesses vom flüssigen zum festen Wachs werden durch den Aggregatzustandswechsel innere Spannungen im Wachs nicht vollständig abgebaut und somit konserviert. Diese Spannungen können dazu führen, dass es bei der Fräsbearbeitung zu ungewollten und nicht vorhersehbaren Abplatzungen und Rissen kommt, sodass der zu produzierende Wackskörper unbrauchbar wird.

2.4 Zusammenfassung

Die zuvor beschriebenen verschiedenen Herstellungsverfahren im Hoch- und Tiefbau haben gezeigt, dass die Divergenz zwischen Formfreiheit und Automatisierung bis heute vorherrscht. Werden individuelle Freiformgeometrien gewünscht, müssen kostenintensive Sonderschalungen zum Teil manuell hergestellt werden. Lediglich bei gleicher Geometrie und hohen Stückzahlen lässt sich derzeit der Produktionsprozess vollständig automatisieren.

Aufbauend auf den Grundlagenforschungsergebnissen von Mainka wird in Kapitel 3 untersucht, welche Prozessschritte notwendig sind, um die Potentiale einer automatisierten und individuellen Fertigung mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie zusammenzuführen. Eine reine Skalierung der Forschungsergebnisse der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie auf großformatige Bauteile ist nur bedingt möglich und durch die Nachteile nicht zielführend und somit in Zukunft nicht konkurrenzfähig im Vergleich zu am Markt verfügbaren Verfahren. Ziel ist es, auf den zuvor beschriebenen Vorteilen aufzubauen und die Limitierung der Skalierung des Prozesses, bedingt durch die aufgezeigten Nachteile, zu überwinden.

3 Definition der Prozessschritte der automatisierten Herstellung von individuellen Betonbauteilen

3.1 Konzept der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie

Um einen neuen Herstellungsprozess auf Basis der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie zu erforschen, muss dieser Gesamtprozess in sinnvolle und aufeinander aufbauende Teilprozesse/Prozessschritte unterteilt werden. Der zu erforschende automatisierte Herstellungsprozess für individuelle Betonbauteile unterteilt sich in fünf Prozessschritte, die in Abbildung 3-1 dargestellt sind. Um den gesamten automatisierten Herstellungsprozess für individuelle Betonbauteile auf Basis der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie vollumfänglich zu entwickeln, müssen alle Prozessschritte dieser Produktionskette erforscht und aufeinander abgestimmt werden. Nur durch eine reibungslose und linear in Reihe geschaltete Produktionskette von aufeinander abgestimmten Prozessschritten ist ein zielführender und wirtschaftlicher Herstellungsprozess zur automatisierten Produktion von individuellen Betonbauteilen möglich.

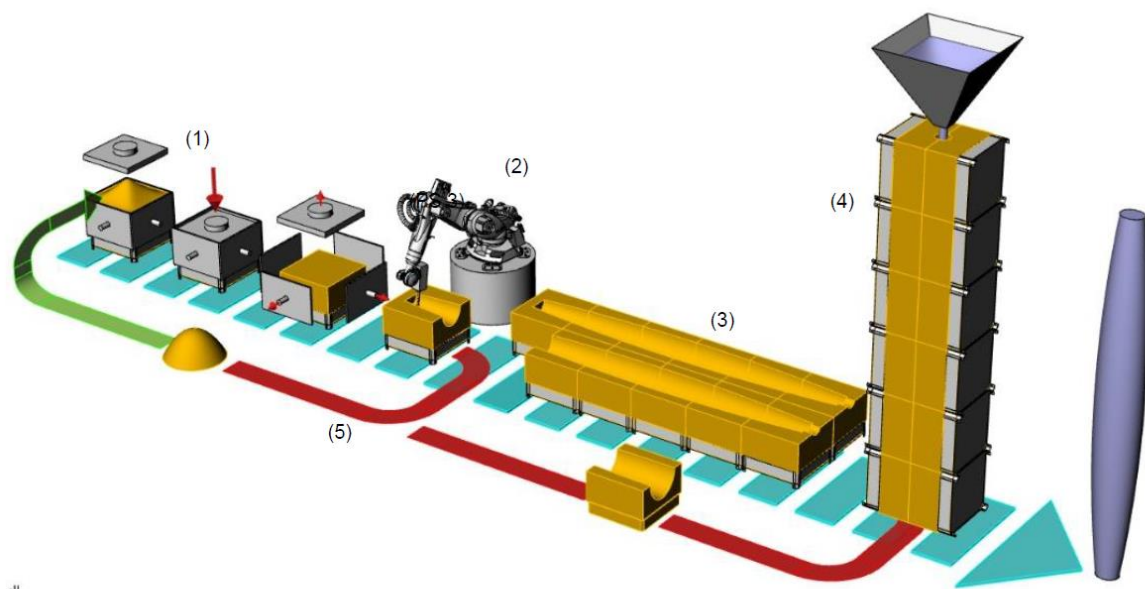


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des automatisierten Gesamtherstellungsprozesses und der Teilprozesse 1 bis 5: (1) Herstellung von Wachsböcken, (2) Zerspaltung von Wachsröhlungen, (3) Modularisierung einer Gesamtschalung, (4) Betonage der Wachsschalungsmodule, (5) Rezyklieren der Wachsröhlungen © ITE

3.2 Herstellung von Wachsröhlungen

3.2.1 Möglichkeiten für die Herstellung von Schalungsröhlungen aus Wachs

In [9] wurde gezeigt, dass es möglich ist, durch Vergießen von Wachstafeln mit flüssigem Wachs großformatige Wachsböcke herzustellen. Dieses Herstellungsprinzip eines 500/500/150 mm großen Wachsblocks sieht vor, dass die zu vergießenden Wachstafeln händisch gehobelt werden und in genauem Abstand zueinander in eine Schalung gestellt werden müssen. Im Anschluss daran werden die Zwischenräume mit heißem Wachs vergossen. Nach einer Abkühlzeit von > drei Stunden konnte der Wachsblock aus der Schalung entnommen werden. Nachteile bei diesem Produktionsverfahren sind zum einen die lange Produktionszeit für einen Wachsblock und zum anderen die notwendigen noch händisch durchzuführenden Vorarbeiten wie das Hobeln der Platten und der Zusammenbau der Schalung sowie die hohen Energiekosten, um Wachs zu schmelzen. Aufgrund der zuvor genannten Nachteile ist dieser Ansatz für die Herstellung von Wachsböcken als Ausgangsmaterial für Wachsschalungskörper für die automatisierte Fertigung ungeeignet. Für den Einsatz von Wachs als Schalungsmaterial in automatisierten Prozessen ist es zielführend, Wachs in Form zu pressen, anstatt es flüssig in Form zu gießen. Das Pressen von Wachs hat zwei wesentliche Vorteile gegenüber dem Gießen von flüssigem Wachs. Pressen von Wachs dauert kürzer als das Vergießen von Wachstafeln, da beim Pressen kalte Wachsspäne zu einem Wachsblock gepresst werden und nicht abkühlen

müssen. Die Energie, die benötigt wird, um die Wachsspäne umzuformen (aus Spänen einen Block pressen), ist im Vergleich zum Schmelzen des Waxes geringer.

3.2.2 Pressverfahren für Pulver, Späne und Granulat verschiedener Stoffe

Pressen von Thermoplasten und anderen Polymeren

Polymere sind Substanzen, die aus einer Vielzahl von sich wiederholenden Makromolekülen aufgebaut sind. Makromoleküle wiederum sind Moleküle, die aus einer großen Anzahl von sich aneinanderreihenden Atomen zusammengesetzt sind. Moleküle zählen zu den Makromolekülen, sobald ihre Molmasse größer als 10 000 g/mol ist. Auch Molmassen von mehreren Millionen g/mol sind möglich. Zum Vergleich liegt die Molmasse von Wasserstoff bei ca. 1 g/mol, die von Sauerstoff bei ca. 16 g/mol und demnach die von einem Wassermolekül (zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom) bei 18 g/mol. In einem Polymer haben alle Makromoleküle den gleichen Aufbau, lediglich ihre Kettenlänge ändert sich. [46, 47] Durch ihre langen Ketten können sie sich gut verzweigen und bilden beispielsweise Duroplaste. [48]

Polymere unterteilen sich je nach thermischem Verhalten in Elastomere, Duroplaste und Thermoplaste. Elastomere sind chemisch vernetzt und in ihrem Verhalten elastisch und gummiartig. Die Vernetzung der Makromoleküle ist hier weitmaschig, sodass sich die Molekülketten beim Aufbringen von Kraft verschieben können. Lässt die Kraft nach, gehen sie wieder in ihre ursprüngliche Form zurück. Bei Duroplasten sind die Ketten stark chemisch vernetzt. Deshalb lässt sich das Polymer nach seinem Aushärten nicht mehr verformen. Zudem schmelzen Duroplaste bei hohen Temperaturen nicht, sondern zersetzen sich ab einer bestimmten Temperatur. Zwischen den Molekülketten der Thermoplaste gibt es, anders als bei den Duroplasten und Elastomeren, keine oder nur sehr geringe chemische Verzweigungen. Wenn keine Vernetzungen vorliegen, wird von amorphen Polymeren gesprochen. Bei vorhandenen Vernetzungen handelt es sich um kristalline Polymere. Diese können jedoch nie gänzlich kristallin sein, weshalb sie als teilkristalline Polymere bezeichnet werden. In der nachfolgenden Grafik ist erkennbar, dass bei amorphen Thermoplasten die Molekülketten ineinander verzweigt sind, chemische Bindungen treten nicht auf. Bei den kristallinen Thermoplasten kommt es stellenweise zu linearen Anordnungen, hier wirken zwischenmolekulare Kräfte. Bei Duroplasten sind chemische Vernetzungen zu sehen.

Die Dichte der Thermoplaste steigt mit der Kristallinität. Bei den meisten Thermoplasten sind Teile der Ketten linear angeordnet. Zwischen ihnen wirken zum Beispiel Van-der-Waals-Kräfte. Diese sind verglichen mit chemischen Verzweigungen schwach, deshalb erweichen Thermoplaste bei bestimmten Temperaturen und lassen sich verformen. Der Prozess des Aufwärmens und Verformens kann beliebig oft wiederholt werden. Um den Temperaturbereich, in dem sich Thermoplaste verformen lassen, einzugrenzen, müssen zunächst die Begriffe *Glasübergangstemperatur* T_g , *Schmelztemperatur* T_m und *Zersetzungstemperatur* T_z definiert werden.

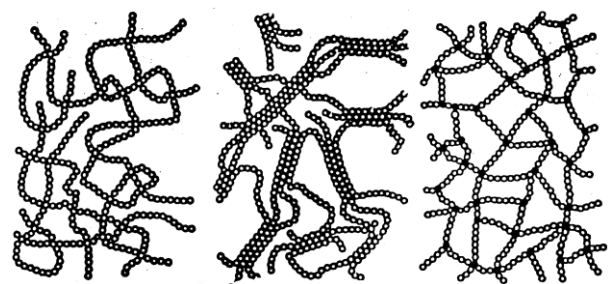


Abbildung 3-2: amorpher Thermoplast, teilkristalliner Thermoplast, vernetzter Duroplast (v. l. n. r.) [49]

Die Glasübergangstemperatur T_g ist die Temperatur, bei der das Polymer vom harten in den weichen, hochviskosen Zustand übergeht. Die Schmelztemperatur T_m ist nur bei teilkristallinen Polymeren vorhanden. Zusätzlich zur amorphen Phase, die bei der Glasübergangstemperatur erweicht, schmilzt auch die kristalline Phase. Mit steigender Kristallinität steigt die Schmelztemperatur, die bei

verschiedenen Wachstypen als Schmelzbereich zu betrachten ist. Bei der Zersetzungstemperatur T_z zersetzt sich das Polymer, da chemische Bindungen zersetzt werden.

Amorphe Polymere lassen sich bei Temperaturen zwischen T_g und T_z durch Pressen verformen. Bei kristallinen Polymeren ist die Verformung zwischen T_m und T_z möglich. Das verwendete Wachs CFW lässt sich mit kristallinen Polymeren vergleichen, da im Wachs unverzweigte, also kristalline Paraffine enthalten sind. Wachse haben kürzere Kohlenwasserstoffketten, weshalb sie nicht so stark erhitzt werden müssen, um umgeformt werden zu können. Sie lassen sich schon vor Erreichen ihrer Schmelztemperatur plastisch verarbeiten.[49–51]

Der wohl bekannteste Thermoplast ist Polyethylen (PE). Dieser wird hier genauer untersucht. PE unterteilt sich in LD-PE (Polyethylen niedriger Dichte) und HD-PE (Polyethylen hoher Dichte). Bei LD-PE liegt die Kristallinität bei 40 % bis 55 %, die Schmelztemperatur beginnt bei 110 °C. Bei HD-PE liegt die Kristallinität zwischen 60 % und 80 %, die Schmelztemperatur beginnt bei 135 °C. PE wird hauptsächlich durch Spritzgießverfahren geformt. Dabei wird das als Granulat vorliegende Material aufgeschmolzen, über Kanäle in die Pressform eingespritzt und verpresst. Abhängig vom verwendeten PE wird die Formmasse auf 160 °C bis 300 °C erhitzt. An der kälteren Wand der Pressform (20 °C bis 70 °C) kühlt das Material ab und erstarrt. Um die Volumenkontraktion während des Abkühlens auszugleichen, wird das Material währenddessen nachgepresst. Die maximalen Druckspannungen beim Pressen der Formen betragen bei LD-PE bis zu 50 N/mm² und bei HD-PE bis zu 120 N/mm². [52–54] In Abbildung 3-3 ist das Spritzgussverfahren schematisch dargestellt.

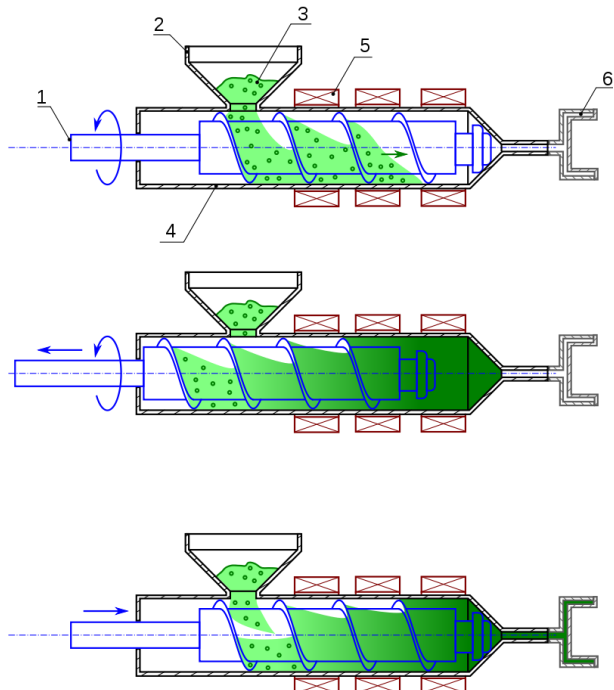


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des Spritzgussverfahrens von Thermoplasten [55]

Dieses Verfahren gliedert sich in drei Schritte. Schritt 1: Das Material (3), meist in Pellets-Form, wird über einen Einfülltrichter (2) in den Plastizierzylinder (4) eingefüllt. Schritt 2: Durch Rotation der Schnecke (1) wird das Material an den Heizelementen (5) vorbeigeführt. Das Material schmilzt und verdichtet sich. Schritt 3: Nachdem das Material im vorderen Bereich geschmolzen ist, wird es unter hohem Druck in die Spritzform gepresst. Durch ein Nachdrücken des geschmolzenen Materials in die Spritzform wird der entstehende Schrumpf in der Spritzform kompensiert. Nach dem Abkühlen kann das hergestellte Produkt aus der Spritzform entnommen werden.

Das Spritzgussverfahren für Thermo-/Duroplasten lässt sich nur bedingt auf das zu entwickelnde Pressverfahren für Wachs übertragen, da beim Spritzgussverfahren vornehmlich kleinvolumige Produkte durch Verpressen von flüssigen Thermo-/Duroplasten mit hohem Druck hergestellt werden. Es kann festgehalten werden, dass Wärme/Hitze einen positiven Einfluss auf das zu verpressende Material hat.

Pressen von Holz und Kork

Holz ist ein nachwachsender und nachhaltiger Rohstoff. Zudem sind seine Anschaffungskosten geringer als die von Wachs. Nachfolgend wird aufgezeigt, wie Holzspäne in bereits entwickelten Prozessen in Form gepresst werden.

Beim Herstellen von Holzpellets werden Holzspäne auf Temperaturen von bis zu 100 °C erhitzt. Dadurch wird Lignin, ein holzeigener Klebstoff, freigesetzt. Anschließend werden die Späne zu Pellets verpresst, wobei das Lignin dafür sorgt, dass sich die Späne verkleben. Gepresst wird mit Matrizenpressen. Teilweise reichen beim Verpressen niedrigere Temperaturen aus, allerdings wird in diesem Fall zum Verkleben beispielsweise Stärke aus Maismehl beigemischt. In Abbildung 3-4 wird der gesamte Prozess der Holzpelletherstellung verdeutlicht. Angaben zum Pressdruck bei der Pelletherstellung wurden in der Literatur allerdings nicht gefunden. [55, 56]

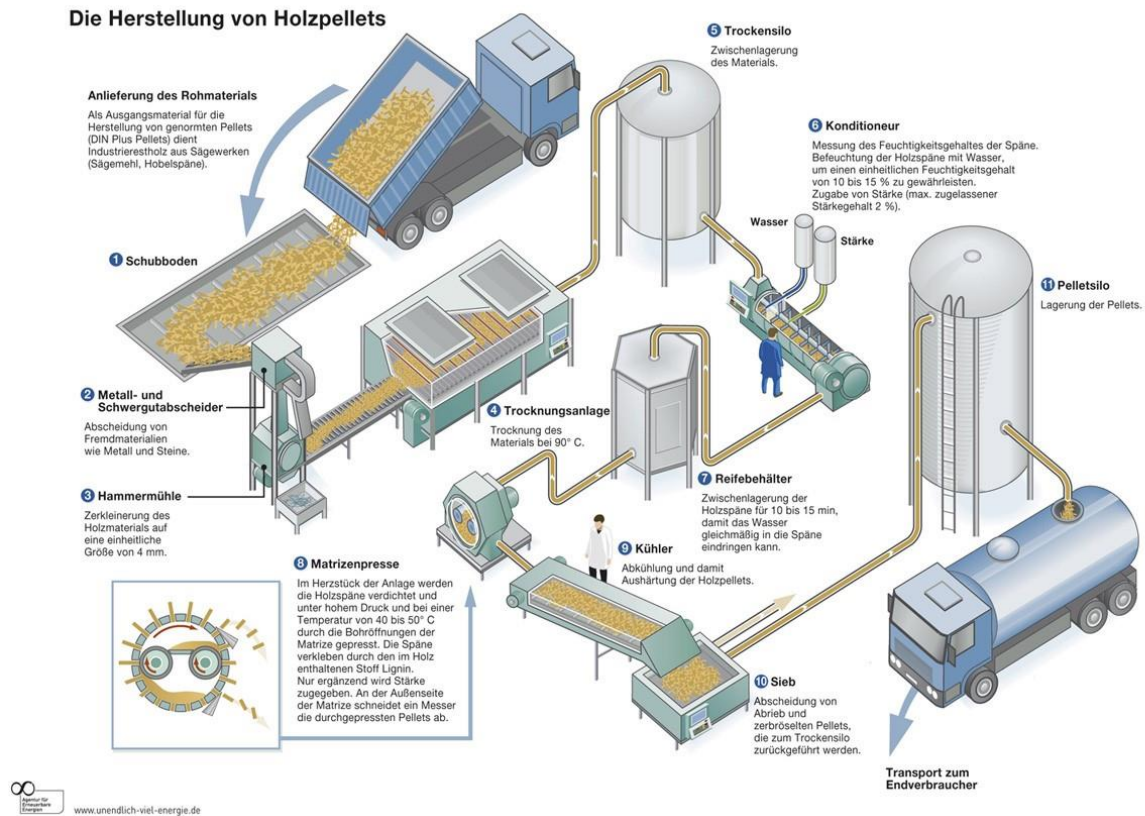


Abbildung 3-4: Herstellung von Holzpellets [56]

Bei der Herstellung von Korkverschlüssen fallen hohe Anteile an Korkabfall an. Kork ist nicht brennbar und hat gute dämmende Eigenschaften. Deshalb werden die anfallenden Abfälle oft zu Wärmedämmplatten verarbeitet. Dazu wird das überschüssige Material zerkleinert und unter hohen Temperaturen verpresst. Im Kork enthaltene Harze werden dabei unter dem Temperatureinfluss freigesetzt und kleben die Korbbestandteile zusammen. Die Zellen im Inneren lösen sich auf und das Granulat verbindet sich. [57] Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei Pressverfahren von Holz und Kork ebenfalls der Parameter Temperatur eine wichtige Rolle bezüglich des Verbunds der gepressten Holz- und Korkspäne spielt. Weitere Rückschlüsse können nicht gezogen werden.

Pressen von Grünlingen in der Keramikherstellung und Metallurgie

In der Keramikherstellung und Metallurgie werden aus Spänen und Pulvern unter hohem Druck Vorformen gepresst. Diese Vorformen werden Grünlinge genannt. Sie besitzen bereits die Form des fertigen Produkts, haben allerdings noch nicht ausreichende Festigkeit erreicht. Diese bekommen die Grünlinge durch das *Sintern*. Dabei werden die Rohformen bis kurz unter die Schmelztemperatur des Ausgangsstoffes erhitzt (Bei Keramiken bis zu 1600 °C) und härten dabei aus. [58] Bei der Herstellung von Grünlingen wurde herausgefunden, dass die Verdichtung über die Höhe eines zylindrischen Körpers abnimmt, da die obere Lage an Spanmaterial beim einseitigen Verdichten von oben einen größeren Weg zurücklegen muss und somit Energie durch Reibung abgebaut wird. Durch den Abbau

der Energie über die Höhe kann es im unteren Bereich zu einer geringeren Verdichtung des Materials kommen, was wiederum geringe Festigkeiten im unteren Bereich zur Folge hat. [59]

Neben dem zuvor schon beschriebenen positiven Einfluss der Temperatur zeigt das Pressen von Grünlingen, dass die Verdichtung und die daraus resultierende Druckfestigkeitsverteilung über die Höhe abnehmen. Diese Besonderheit ist in Bezug auf das Pressen von Wachsspänen in späteren Versuchen zu untersuchen.

Tablettenherstellung in der Pharmaindustrie

In der Pharmazie werden heutzutage Medikamente als feste Arzneiform in Form von Tabletten hergestellt und vertrieben. Tabletten werden aus einer Mischung verschiedener Stoffe in Pulverform in Tablettenformen gepresst (Abbildung 3-5).

Gängige Tablettenabmessungen weisen Durchmesser $\varnothing = 6,0 \text{ mm} - 15 \text{ mm}$ und Höhen $h = 1,8 \text{ mm} - 8,0 \text{ mm}$ auf. Grundbestandteil (Basisrezeptur) von Tabletten sind Stärke, Bindemittel und Milchsücker. Das Verhältnis zwischen Durchmesser und Höhe der Tablettenform ist aus pharmazeutischer Sicht auf das Füllraumvolumen der Tablettenpresse und die Ästhetik zurückzuführen. In Abbildung 3-6 ist die Standardisierung von Tablettengrößen abgebildet.

Der blaue Bereich in Abbildung 3-6 gibt an, welche Tablettenvolumina mit gängigen Tablettenpressen und passenden Werkzeugen hergestellt werden können. Üblicherweise werden Tabletten mit Exzenterpressen aufgrund der Anforderung an die Produktion von hohen Stückzahlen produziert. In Abbildung 3-7 ist der schematische Aufbau einer Exzentertablettenpresse dargestellt.

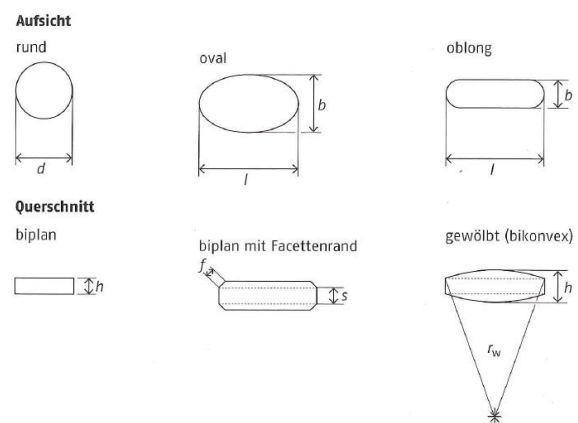


Abbildung 3-5: Gängige Tablettenformen [60]

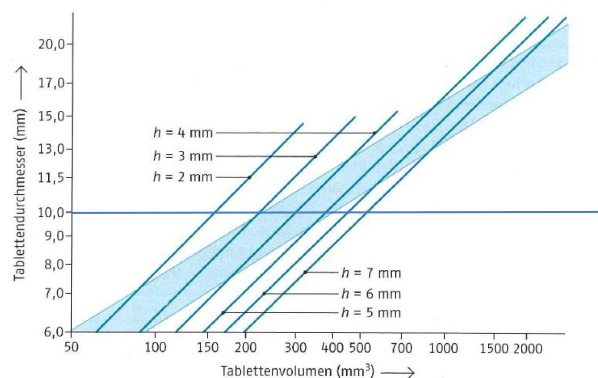


Abbildung 3-6: Standardisierung von Tablettengrößen

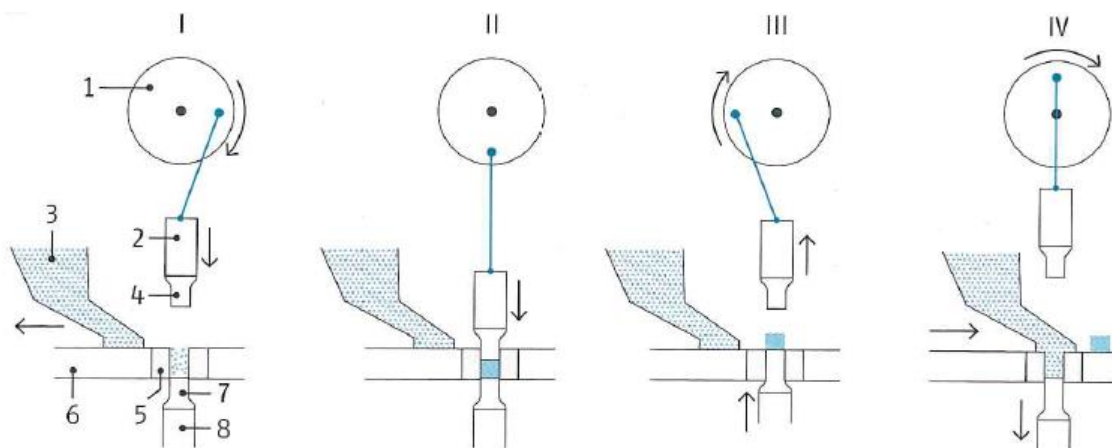


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung des Pressvorgangs (Exzenterpresse) [60]. (1) Exzenterzscheibe, (2) Oberstempelhalter, (3) Fülltrichter, (4) Oberstempel, (5) Matrize, (6) Matrizenplatte, (7) Unterstempel, (8) Unterstempelhalter

Der Produktionsprozess umfasst vier Schritte. Im ersten Schritt (I) wird das Tablettenpulver in den Füllraum gefüllt und die Exzentrzscheibe beginnt sich zu drehen. Im zweiten Schritt (II) fährt der Oberstempel in den Füllraum und presst dadurch Tablettenpulver zusammen. Im dritten Schritt (III) wirft der Unterstempel die gepresste Tablette aus. Im vierten Schritt (IV) wird der Füllraum wieder mit Tablettenpulver befüllt. Gleichzeitig wird die zuvor produzierte Tablette verschoben. Solch eine Exzenterpresse kann zwischen 1500 bis 3000 Tabletten pro Stunde produzieren. Der Zusammenhalt der gepressten Tabletten, auch Presslinge genannt, ist auf Kohäsions- bzw. Adhäsionskräfte, Feststoffbrücken und in Spezialfällen formschlüssige Bindungen zurückzuführen. [60] Die maximale Presskraft einer solchen Exzenterpresse liegt im Allgemeinen bei ca. 500 - 1000 N/mm². [61] Durch die hohen Presskräfte in diesem Prozess kann das Pulver kalt gepresst werden. Eine thermische Vorbehandlung/Erwärmung des Pulvers muss aus dem Grund, dass der im Pulver enthaltene Wirkstoff durch die Erwärmung beschädigt werden könnte, ausgeschlossen werden.

Kerzenherstellung

Aus theoretischer Sicht ist das große Problem bei der Kerzenherstellung der Mangel an wissenschaftlicher Literatur. Dies liegt zum einen daran, dass die Produzenten von Kerzen ihre Produktion auf ausreichenden Erfahrungswerten aufbauen können, diese Erfahrungswerte aber teilweise stark auseinandergehen. Zum anderen sind Informationen zu Herstellungsverfahren oder verwendeten Stoffen oft gut gehütete Unternehmensgeheimnisse. Deshalb wird in diesem Abschnitt nur kurz auf die Kerzenproduktion eingegangen.

Die Verfahren zur Kerzenherstellung können je nachdem, ob das Kerzenmaterial bei der Herstellung fest oder flüssig ist, in Kalt- und Warmverfahren eingeteilt werden. Diese beiden Verfahren können wiederum unterteilt werden. Abbildung 3-8 veranschaulicht diese.

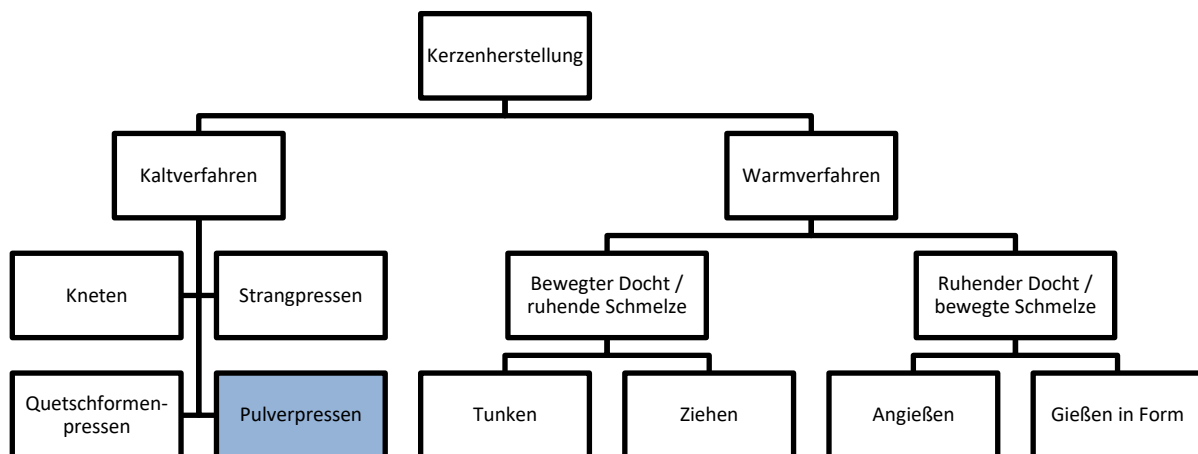


Abbildung 3-8: Unterteilung der Verfahren zur Kerzenherstellung nach [62]

Das Verfahren, das dem Pressen von Wachsspänen nahe kommt, ist das in Abbildung 3-8 in blau dargestellte Pulverpressverfahren. Bei diesem werden pulverförmiges Material oder Späne unter hohem Druck in Form gepresst. Dabei handelt es sich meist um Paraffine. Die Späne werden im festen oder plastischen Zustand eingeführt. Mit diesem Verfahren werden hauptsächlich kleine Kerzen wie Teelichter produziert. Die Festigkeit der gepressten Kerzen spielt eine untergeordnete Rolle und der Produktionsprozess ist auf eine hohe Stückzahl ausgelegt. Mit neuesten Maschinen können bis zu 75.000 Kerzen in einer Stunde hergestellt werden. Parameter wie Herstellungstemperaturen oder Druckkräfte sind in der vorhandenen Literatur nicht enthalten. [62, 63]

3.2.3 Erkenntnisse aus den Pressverfahren für den zu entwickelnden Pressprozess

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es vergleichbare Verfahren in der Industrie gibt, die sich jedoch nur bedingt auf das Pressen von Wachsspänen anwenden lassen. Alle zuvor beschriebenen Herstellungsverfahren produzieren unter Einsatz von Temperaturen von z. T. mehreren hundert Grad und Presskräften von bis zu 1000 N/mm^2 nur kleinvolumige Produkte wie Teelichter, Spritzgussteile oder Tabletten. Eine reine Skalierung und damit eine direkte Übertragung dieser Technologien auf den zu erforschenden Pressprozess von großformatigen Wachsblöcken ($1000/1000/1000 \text{ mm}$) hätten Presskräfte von rund $1.000.000 \text{ kN}$ bezogen auf eine Pressfläche von einem Quadratmeter zur Folge. Diese Presskraft liegt weit über jener derzeit herstellbaren Presse. Die reine Skalierung ist somit für einen automatisierten Prozess nicht zielführend. Dennoch können Erkenntnisse aus den zuvor beschriebenen Pressverfahren für das Pressen von großformatigen Wachsblöcken abgeleitet werden. Zum einen ist in späteren Versuchen der Einfluss der Temperatur auf die Festigkeit der gepressten Wachsblöcke zu nennen, zum anderen besteht die Tatsache, dass die Verdichtung über die Höhe bedingt durch Reibungsverluste abnimmt. Diese Faktoren sind zu untersuchen. Abschließend lässt sich festhalten, dass es derzeit keinen vergleichbaren industriellen Prozess gibt, der Späne oder Pulver in großformatige Blöcke presst.

3.3 Zerspanung von Wachsrohlingen

Nach [64, 65] bezeichnet das Zerspanen eines Werkstoffe das Fertigen durch Abtrennen von Werkstoffteilchen auf mechanischem Weg. Fräsen ist ein Zerspanungsverfahren, bei dem die Bearbeitung mit einem kreisförmigen und meist mehrschneidigen Werkzeug ausgeführt wird. [65, 66] Die Fräsbearbeitung wird nach DIN 8580 [67] und DIN 8589 [68] der Spanbearbeitung mit geometrisch bestimmten Schneiden zugeordnet. Wie schon in 2.1.2 beschrieben, produzieren gängige, am Markt verfügbare, industrielle Fertigungsprozesse mittels Zerspanung von unterschiedlichen Materialien Schalungselemente. Die Effektivität dieser Prozesse hängt von dem zu zerspanenden Material, der Frässtrategie und den eingesetzten Fräs Werkzeugen ab. Meist werden für diese Prozesse Kunststoffe oder Polyurethane (PU) verwendet. Der digitale Entwurf der Schalungsgeometrie wird durch geeignete Softwarelösungen in Frässtrategien umgewandelt. Mittels eines Bearbeitungszentrums werden die Werkstücke durch geeignete Fräs Werkzeugzeuge zerspan. Der Fräsprozess im Allgemeinen unterteilt sich in zwei Unterprozesse, die Grobzerspanung (Schrupp-Prozess) und die Feinzerspanung (Schlichtprozess) (Abbildung 3-9).

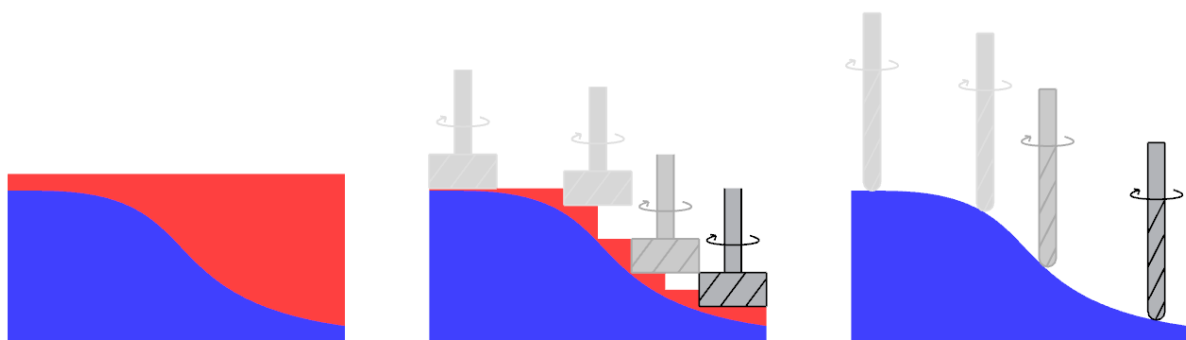


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung eines Fräsprozesses – herzustellende Geometrie in Blau und Material, das zerspan werden muss, in Rot; Schrupp-Prozess mit Walzenstirnfräser von links nach rechts; Schlichtprozess mit Radiusfräser von links nach rechts (v. l. n. r.)

Im Schrupp-Prozess wird das Ziel verfolgt, möglichst viel nicht benötigtes Material mittels großer Fräs Werkzeugzeuge stufenweise zu zerspanen (hohes Zeitspanvolumen/Abtragsrate). Das zu zerspanende Werkstück wird layerbasiert in mehrere Bearbeitungsebenen unterteilt. Die Genauigkeit der Oberfläche spielt in diesem Prozess eine untergeordnete Rolle. Das Fräs Werkzeugzeug im Schrupp-Prozess tangiert die Soll-Oberfläche der zu erzeugenden Geometrie mit einem Abstand von wenigen Millimetern. Dieser Abstand wird Schlichtzugabe genannt. Die Fräsbahnplanung im Schrupp-Prozess folgt dem Top-Down-

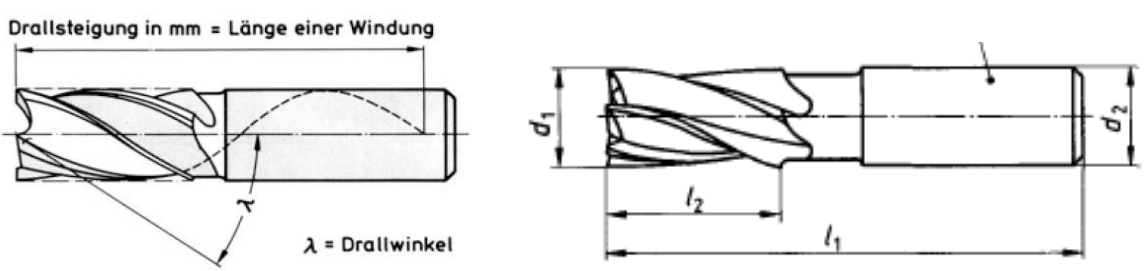
Prinzip (Bearbeitung stufenweise von oben nach unten) (Abbildung 3-9, mittig). Für den Schrubb- Prozess kommen üblicherweise Walzenstirnfräser und Schaftfräser als Fräswerkzeuge zum Einsatz.

Der Schlichtprozess, der auf dem Schrubb-Prozess aufbaut, finalisiert die zu erzeugende Oberflächengeometrie. Mit geeigneten Fräswerkzeugen fährt dieser Prozess die genaue Oberfläche der zu erstellenden Geometrie ab. Die Frässtrategie im Schlichtprozess wird ebenfalls anhand der in Abbildung 3-13 dargestellten Strategien festgelegt. Das Zeitspanvolumen im Schlichtprozess ist gering (geringe Abtragrate). Geeignete Fräswerkzeuge für diesen Prozess sind Schaftfräser und Kugelpkopfräser.

3.3.1 Geeignete Fräswerkzeuge

Wie in 3.2 erläutert, existiert derzeit kein industrieller Fertigungsprozess, der großformatige Wachsblöcke mittels Zerspanung bearbeitet. Auch andere am Markt verfügbare Fräsprozesse für andere Materialien lassen sich nur bedingt auf das Zerspanen von Wachs übertragen. Durch den Fräsprozess wird unter anderem Wärme in das Fräswerkzeug, jedoch auch in das Werkstück induziert. Klassische zerspanbare Materialien wie Stahl oder Aluminium haben im Vergleich zum Werkstoff Wachs andere Stoffeigenschaften und einen höheren Schmelzpunkt. Wachs im Allgemeinen gleicht eher einem thermoplastischen Kunststoff und wird durch den Wärmeeintrag (Temperaturen um die 60 °C) plastisch verformbar. Auch der Zerspanungsprozess von wachsähnlichen Materialien wie Kunststoffen ist eine Nische. Es gibt auf dem Markt keine speziellen Fräswerkzeuge für die Kunststoffbearbeitung. Hier wird üblicherweise auf Fräswerkzeuge für die Aluminiumzerspanung zurückgegriffen. Wichtig ist, dass die Fräser keine Beschichtung besitzen, da sonst die geringe Kantenverrundung die geschliffene Schneide abrunden und somit einen negativen Einfluss auf das Schneidvermögen des Fräswerkzeuges haben kann. Nach [9] eignen sich Fräser für die Zerspanung von Wachs, die einen möglichst großen Neigungswinkel γ , bei Fräswerkzeugen Drillwinkel genannt, sowie eine möglichst geringe Anzahl an Schneiden besitzen, um einen großen Freiraum zwischen den Schneiden zu gewährleisten (Spanraum), sodass der Fräser die Späne wirkungsvoll vom zu zerspanenden Material schneiden/abtrennen und die anfallenden Späne effizient abtransportieren kann. Dadurch wird vermieden, dass sich der Fräser durch die Ansammlung von Spänen, die nicht abtransportiert werden können, zusetzt, was negative Auswirkungen auf das Fräsergebnis hat. Im Allgemeinen werden folgende Bezeichnungen für Maßangaben für Fräswerkzeuge festgelegt:

Tabelle 3-1: Definition des Drillwinkels und Maßangaben von Schaftfräsworkzeugen [66, 69–71]

	
Parameter	Einheit
Drillwinkel λ	°
Schneidendurchmesser d_1	[mm]
Schaftdurchmesser d_2	[mm]
Werkzeuglänge l_1	[mm]
Schneidenlänge l_2	[mm]
Schneidenanzahl z	./.

Walzenstirnfräser

Walzenstirnfräser eignen sich zum Schrappen und Schlichten von ebenen Flächen und werden zur Herstellung von rechtwinklig abgesetzten Flächen eingesetzt. Zusätzlich zu den außenliegenden Umfangschneiden besitzt der Walzenstirnfräser noch Schneiden an einer Stirnseite [66]. Fräswerkzeuge im Allgemeinen werden in drei Werkzeug-Anwendungsgruppen nach DIN 1836 [72] unterteilt.

- Typ N: grobverzahnt, Einsatz für normale Maschinenbaustähle
- Typ H: feinverzahnt, Einsatz für harte und zäharte Werkstoffe
- Typ W: besonders grobverzahnt, Einsatz für weiche und zähe Werkstoffe

In Abbildung 3-10 wird am Beispiel von Walzenstirnfräsern die Unterteilung von Fräswerkzeugen in die drei zuvor genannten Typen deutlich. Walzenstirnfräser im Speziellen sind nach DIN 1880 [73] und DIN 8056 [74] genormt:



Abbildung 3-10: Walzenstirnfräser, links-Typ N, mittig-Typ H, rechts-Typ W [66]

Tabelle 3-2: am Markt verfügbare Walzenstirnfräser [66]

Schneidendurchmesser d_1 [mm]	Schneidenlänge l_2 [mm]	Schneidenanzahl z		
		Typ N	Typ H	Typ W
30-150	30-63	6-14	10-20	3-8

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich Walzstirnfräser des Typs W für die Zerspanung von Wachs im Schrapp- sowie Schlichtprozess eignen. Diese Fräswerkzeuge besitzen einen großen Drallwinkel γ und eine möglichst geringe Anzahl an Schneiden. Speziell im Schrapp-Prozess, wo diese Fräser vornehmlich ihren Einsatz finden, ist es wichtig, Zeitspanvolumen zu erzielen, das, bedingt durch große lieferbare Fräswerkzeug-Geometrien, möglich ist.

Schaftfräser

Schaftfräser unterteilen sich in Fräser mit zylindrischem und kegeligem Schaft sowie Wendelbohrer. In diesem Abschnitt wird nur auf die Schaftfräser mit zylindrischer Form eingegangen. Diese sind vergleichbar mit den Walzenstirnfräsern, wobei diese Fräser Typen im Vergleich zu Walzenstirnfräsern ein größeres Verhältnis zwischen Schneidenlänge und Schneidendurchmesser aufweisen.



Abbildung 3-11: Schaftfräser unterteilt in drei Werkzeugtypen [66, 72]

Auch hier ist der Fräser Typ W für die Zerspanung von Wachs zu bevorzugen.

Tabelle 3-3: am Markt verfügbare Schaftfräser [69, 70]

	Schneidendurchmesser d_1 [mm]	Fräserlänge l_1 [mm]	Schneidenzahl z
Typ N	1,9 - 67	51 - 282	3 - 10
Typ H			k. A.
Typ W	4,75 - 67		2 - 4

Radiusfräser

Radiusfräser unterliegen im Gegensatz zu den zuvor genannten Fräswerkzeugen keiner normativen Regelung. Jeder Hersteller fertigt nach seinen Anforderungen Radiusfräser mit möglichst hoher Genauigkeit. In Abbildung 3-12 ist ein Beispiel für einen Radiusfräser abgebildet.



Abbildung 3-12: Radiusfräser mit zwei Schneiden

Radiusfräser sind so konstruiert, dass der Übergang zwischen der Stirn- und Umfangschneide bei Rotation des Fräswerkzeuges eine halbkugelförmige Kontur erzeugt. Dieser Typ eignet sich besonders zum Fräsen von Freiformflächen und wird vornehmlich im Schlichtprozess eingesetzt.

Tabelle 3-4: am Markt verfügbare Radiusfräser [75]

Schneidendurchmesser d_1 [mm]	Fräserlänge l_1 [mm]	Schneidenzahl z
0,5 - 20	38 - 150	2 und 4

Durch die fehlende Normung wird auf Herstellerangaben zurückgegriffen, um Aussagen zu den lieferbaren Größen von Radiusfräsern treffen zu können. Die Angaben zu den Abmessungen und der Schneidenzahl der Radiusfräser wurden dem Produktkatalog der Firma Gühring KG entnommen. [75] Es kann festgehalten werden, dass das Haupteinsatzgebiet von Radiusfräsern der Schlichtprozess ist. Dafür spricht ein lieferbarer maximaler Durchmesser von 20 mm. Mit solch einem geringen Durchmesser im Vergleich zu den Walzenstirnfräsern ist ein Schrapp-Prozess mit hohem Zeitspanvolumen wirtschaftlich nicht umsetzbar.

3.3.2 Fräsbahnplanung

Eine Oberflächengeometrie, die mittels Zerspanung aus einem Werkstück erzeugt werden soll, muss durch eine Fräsbahnplanung (Frässtrategie) beschrieben werden. Diese Fräsbahnplanung kann von Hand oder programmgesteuert erstellt werden. Sie gibt an, auf welchen Bahnen sich das Fräswerkzeug über die Oberflächengeometrie bewegt. Durch die Festlegung von Bearbeitungsparametern (Abbildung 3-14) wie Schnittbreite und Arbeitseingriff werden die einzelnen Fräsbahnen erstellt.

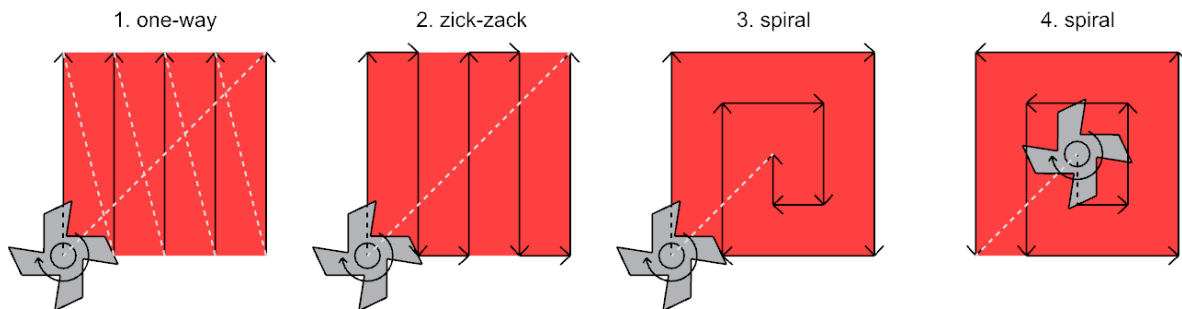


Abbildung 3-13: Frässtrategien, schwarze Pfeillinien sind Fräswege, grau-gestrichelte Linien sind Leerfahrten des Fräswerkzeugs

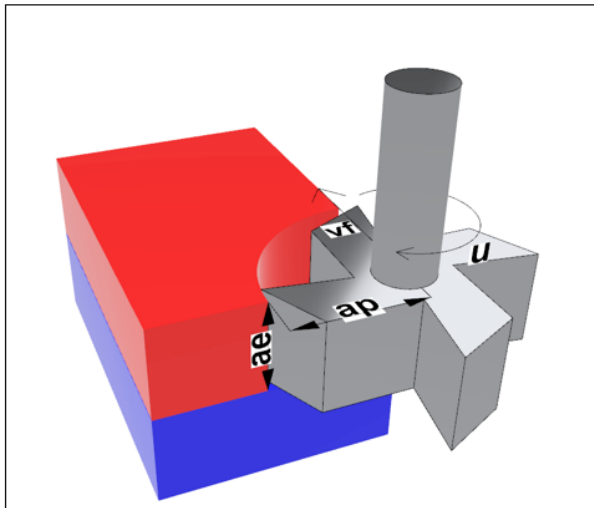
In Abbildung 3-13 sind die vier gängigsten Frässtrategien dargestellt. Diese werden durch deren unterschiedliche Bahnplanungen in folgende Strategien unterteilt:

1. one-way: Hierbei wird das Fräswerkzeug immer in der gleichen Richtung über das Werkstück gefahren. Dadurch tritt eine hohe Anzahl an Leerfahrten für das Fräswerkzeug (Fahrten, in denen kein Material zerspannt wird) auf.
2. zick-zack: Bei dieser Frässtrategie wird ein zusammenhängender Fräsweg über die gesamte zu fräsende Fläche des Werkstücks anhand eines Zick-Zack-Musters generiert. Bei diesem Modell werden Leerfahrten reduziert.
3. spiral: Bei dieser Frässtrategie wird ein zusammenhängender Fräsweg über die gesamte zu fräsende Fläche des Werkstücks anhand eines Spiral-Musters von außen nach innen generiert. Die Leerfahrten werden im Vergleich zur Zick-Zack-Strategie nochmals reduziert.
4. spiral: gleiche Strategie wie Nr. 3, jedoch wird das Spiral-Muster von innen nach außen generiert.

Durch die Wahl der richtigen Frässtrategie können Leerfahrten vermieden und somit die Bearbeitungszeit reduziert werden. Anhand dieser unterschiedlichen Vorgehensweisen wird deutlich, dass die Wahl der richtigen Strategie direkten Einfluss auf die Bearbeitungszeit/Fräszeit eines Werkstücks und somit auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses hat. Auch Kombinationen aus den zuvor genannten Strategien sind möglich und oft zielführend.

Ein weiterer wichtiger Punkt hinsichtlich der Zerspanung von Wachs ist die Wahl der richtigen Bearbeitungsparameter. In Abbildung 3-14 sind die wichtigsten schematisch dargestellt.

Die Schnittbreite a_p gibt an, wie weit das Fräs Werkzeug horizontal in das Werkstück eintaucht. Sie ist mit dem zu erzeugenden Bahnabstand im Fräsprozess gleichzusetzen und kann nicht größer als der Schneidendurchmesser d_1 sein. Der Arbeitseingriff a_e legt den vertikalen Abstand zwischen zwei Bearbeitungsebenen fest. Der Arbeitseingriff a_e kann nicht höher als die Schneidenlänge l_2 sein. Die Drehzahl u beschreibt die Umdrehungsgeschwindigkeit des Fräs Werkzeuges und die Vorschubgeschwindigkeit v_f stellt die Geschwindigkeit dar, mit der das Fräs Werkzeug entlang seiner Fräsbahn durch das zu zerspanende Material bewegt wird. Anhand dieser Parameter und der Wahl eines geeigneten Fräs Werkzeuges können weitere Parameter bestimmt werden, anhand derer spätere Fräsprozesse verglichen werden können. Durch diesen Vergleich kann eine Aussage zur Effektivität des jeweiligen Fräsprozesses getroffen werden.



Parameter	Einheit
Schnittbreite (Zustellung) a_p	[mm]
Arbeitseingriff a_e	[mm]
Drehzahl u	[1/min]
Vorschubgeschwindigkeit v_f	[mm/min]

Abbildung 3-14: schematische Darstellung der Bearbeitungsparameter beim Fräsen mit bestimmten Schneiden

Tabelle 3-5: resultierende Bearbeitungsparameter für Fräs Werkzeuge mit bestimmten Schneiden

Parameter	Einheit	Formel	Beschreibung
Schnittgeschwindigkeit v_c	[mm/s]	$v_c = d_1 * n * \pi$	Die Schnittgeschwindigkeit ist der Weg, den ein Zahn in einer Sekunde zurücklegt.
Vorschub je Schneide f_z	[mm]	$f_z = \frac{v_f}{(n * z)}$	Das Maß für den Vorschub (Einschnitt) einer Schneide pro Umdrehung des Fräs Werkzeuges
Zeitspanvolumen Q	[mm ³ /s]	$Q = v_f * a_e * a_f$	Das in Form von Spänen in einer bestimmten Zeit abgetragene Volumen an Material

3.4 Modularisierung einer Gesamtschalung

Schon zu Beginn des Schalungsbaus im 19. Jahrhundert wurden Schalungen aus *Teilsystemen* wie Brettern, Tafeln und Pfosten zu einer Gesamtschalung vor Ort zusammengebaut. Heutzutage bestehen Standardschalungssysteme wie z. B. Rahmenschalungen ebenfalls aus Teilsystemen, die vor Ort auf der Baustelle modular zusammengesetzt werden. Diese können in ihrer Höhe und Breite beliebig verlängert werden (Abbildung 3-15).



Abbildung 3-15: Modular zusammengesetzte Rahmenschalung für gerade Wandsysteme von Peri GmbH [76]

Ebenso werden Spezialschalungssysteme derzeit modular errichtet, um Freiformbetonbauteile herstellen zu können (Abbildung 2-11, mittig). Zur Erzeugung von großformatigen Betonbauteilen muss die dafür benötigte Schalung transportbedingt segmentiert und in Teilsysteme unterteilt werden. Im Hinblick auf die maschinell hergestellten EPS-Sonderschalungen ist es zudem unwirtschaftlich, großformatige Negativformen aus EPS in einem Stück zu fertigen. Das benötigte Bearbeitungszentrum müsste aufgrund der benötigten großformatigen Negativform einen großen Bauraum besitzen, was sich auf das gesamte Verfahren wirtschaftlich nachteilig auswirkt. Es ist zielführender, die Negativform in einzelne Segmente zu unterteilen und gleichzeitig herzustellen. Der *Farm-Gedanke*, viele gleiche kleinformatige Bearbeitungszentren anstatt eines großen Bearbeitungszentrums zu betreiben, ist hinsichtlich der gesteigerten Produktivität heutzutage eine sinnvolle Alternative. In der 3D-Drucktechnik wurden die positiven Eigenschaften einer 3D-Drucker-Farm hinsichtlich einer verkürzten Herstellzeit schon erkannt. Da der 3D-Druck von großformatigen Bauteilen zum einen durch den derzeit noch limitierten Bauraum von 3D-Druckern sowie deren noch geringe Druckgeschwindigkeit begrenzt ist, wird versucht, viele 3D-Drucker parallel zu betreiben. Jeder druckt gleichzeitig ein Segment eines herzustellenden Objekts. Im Anschluss an den Druckprozess kann das Objekt aus den einzelnen Segmenten zusammengesetzt werden. Die Druckzeit des herzustellenden Objekts reduziert sich durch das parallele Betreiben von z. B. zehn 3D-Druckern um das Zehnfache im Vergleich zur Herstellung des Objekts mit nur einem 3D-Drucker. Ein weiterer positiver Effekt zeigt sich beim Ausfall eines 3D-Druckers. Fällt in einer Farm einer von zehn aus, verlängert sich die Produktionszeit um ca. 10 %. Fällt jedoch ein 3D-Drucker aus, der das herzustellende Objekt alleine produzieren soll, steht der gesamte Herstellungsprozess still. Der Farm-Gedanke ist hinsichtlich großformatiger Betonbauteile im Hochbau und der daraus resultierenden Modularisierung/Segmentierung der Gesamtschalung als zielführend zu betrachten. Aus den zuvor genannten Gründen wird in diesem automatisierten und individuellen Herstellungsprozess der Ansatz verfolgt, Wachsschalungsmodule maschinell zu bearbeiten und diese im Anschluss zu einer Gesamtschalung zusammen zu setzen.

3.4.1 Herstellung von 1:1-Schalungen in Modulbauweise

Die Kooperationsfirma B+S Engineering GmbH besitzt eine Großpresse, die zur Herstellung der Wachsschalungsmodule verwendet wird. Anhand dieser Großpresse wurden die maximalen Abmessungen der Stahlverbindungseinheit (SVE) festgelegt. Wie in Abbildung 3-16 zu sehen, besitzt die Großpresse der B+S Engineering GmbH einen runden Arbeitsraum von $\varnothing = 1000$ mm, eine maximale Presskraft von 3500 kN und einen maximalen Hub des Stempels von ~2200 mm.

Um die Presse nicht anpassen zu müssen, wurde das Ziel verfolgt, runde und im Durchmesser 1000 mm große Wachsschalen auf die Stahlverbindungseinheit zu pressen und durch Fräsbearbeitung der Seiten die gewünschte quadratische Zielform für die Wachsschale zu erhalten (Abbildung 3). Für die Größe der quadratischen SVE ergibt sich bei einem Kreis von 1000 mm Durchmesser eine maximale quadratische Kantenabmessung von $a/b = 707/707$ mm. Ausgehend von dieser Annahme wurden die Abmessungen der Stahlverbindungseinheit auf $a/b = 700/700$ mm festgelegt. Die Höhe des Wachsschalen kann zwischen 100 mm und 1100 mm variieren. Sie kann somit sinnvoll an die zu erzeugende Geometrie angepasst werden. Ein Vorteil dieser Herangehensweise ist es, dass aufgrund der hochgenauen Bearbeitung aller Seiten der Wachsschale diese im späteren Prozess passgenau zu einer Gesamtschalung zusammengefügt werden können.



Abbildung 3-16: 3500-kN-Großpresse der B+S Engineering GmbH

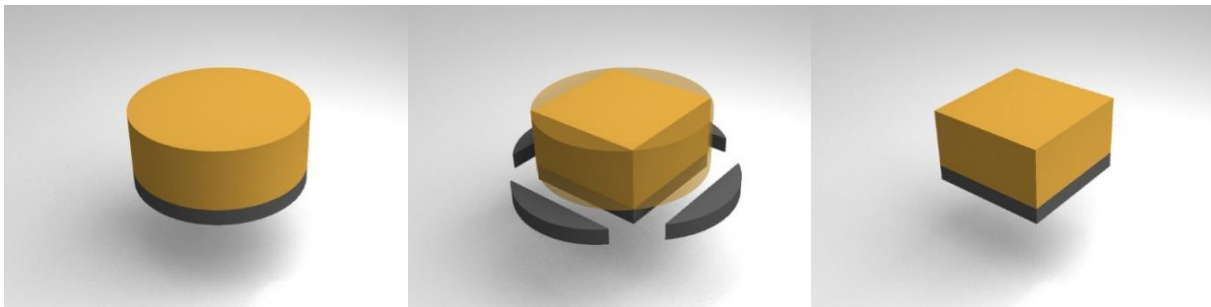


Abbildung 3-17: Gepresster runder Wachsschalen auf SVE $\varnothing = 1000$ mm, Fräsbearbeitung der Seiten, fertiger Wachsschalen 700/700 mm mit variabler Höhe (v. l. n. r.)

In Abbildung 3-17 wird der Herstellungsprozess des finalen quadratischen Wachsschalens gezeigt. Abbildung 3-17 links zeigt den runden Wachsschalen, der mit Hilfe der Großpresse aus Wachsspänen/-granulat durch Aufpressen auf die SVE hergestellt wird. Im Anschluss werden Füllstücke der SVE (vier Stahlformen von Kreisabschnitten) entnommen und das überstehende Wachs hochpräzise abgefräst. Das Resultat (Abbildung 3-17 rechts) ist ein hochpräziser Wachsschalen, aus dem im Nachgang mit Hilfe geeigneter Fräsbearbeitung die gewünschte Zielgeometrie herausgefräst werden kann.

Die SVE beinhaltet dabei folgende Konstruktionsmerkmale:

- präzise Herstellung aus robustem und widerstandsfähigem Material,
- Staplertaschen, um Handling mit Flurförderfahrzeugen/Kran zu ermöglichen,
- Verbindungsmöglichkeiten zwischen den SVE, um diese untereinander verbinden und zu einer Gesamtschalung zusammensetzen zu können,

3. Definition der Prozessschritte der automatisierten Herstellung von individuellen Betonbauteilen

- Verbindungsmöglichkeiten zwischen SVE und Wachs, um Wachs auf der SVE kraftschlüssig zu befestigen.

In Bezug auf die Größe der Grundform von 700/700 mm hat sich durch mehrmalige Optimierung der SVE folgender digitaler Entwurf als zielführend herausgestellt (Abbildung 3-18).

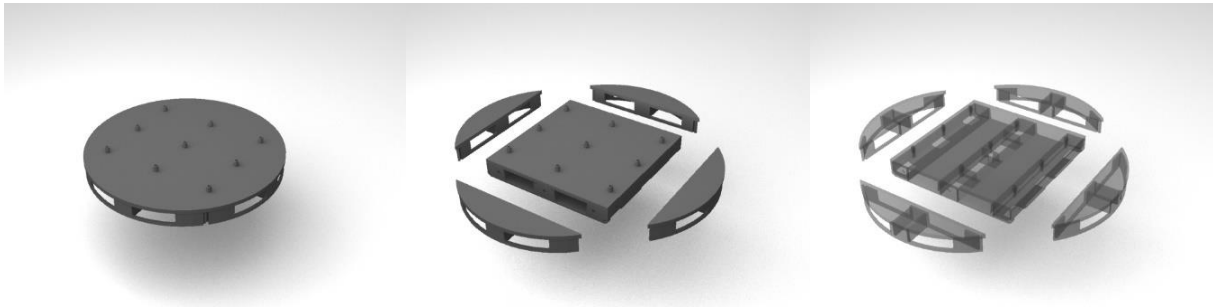


Abbildung 3-18: Finaler Entwurf der SVE, Darstellung der abnehmbaren Füllstücke, halbdurchsichtige Darstellung der SVE mit abnehmbaren Füllstücken (v. l. n. r.)

Im Anschluss an den Entwurf der SVE wurde ihre Verformung beim Pressvorgang mit Hilfe eines Finites-Element-Programms (FEM) simuliert. Abbildung 3-19 zeigt die Verformung unter der maximalen Presskraft der Großpresse von 3500 kN.

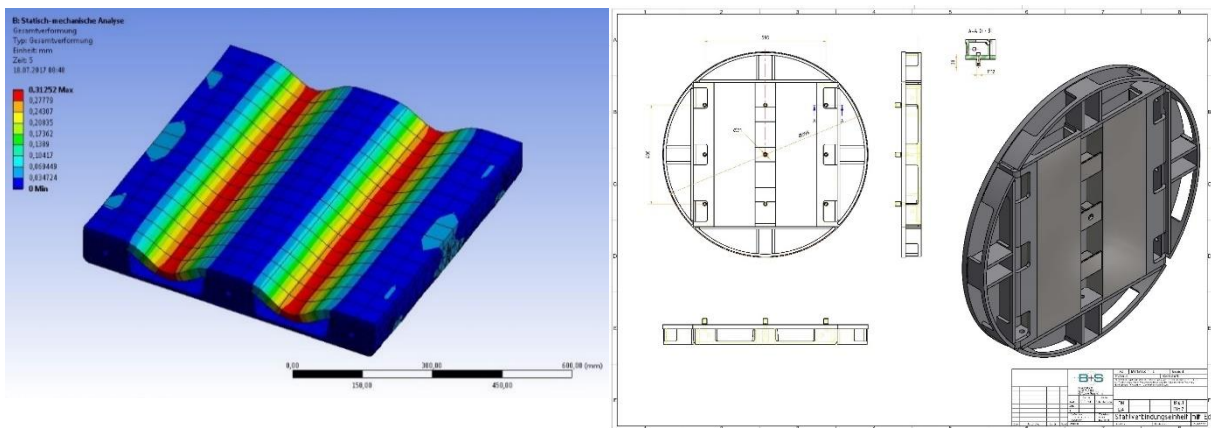


Abbildung 3-19: FEM-Simulation der SVE unter maximaler Presskraft von 3500 kN; Konstruktionszeichnung der Stahlverbindungseinheit (SVE) mit Füllstücken (v. l. n. r.)

Wie auf der Abbildung zu sehen ist, liegt die maximale Verformung der SVE unter 3500 kN Presskraft bei lediglich ~0,31 mm. Diese Verformung ist vernachlässigbar und kann durch das Material während des Pressvorgangs egalisiert werden. Aufbauend auf dem digitalen Entwurf der B+S (Abbildung 3-18) und der FEM-Berechnung des ITE (Abbildung 3-19) wurde für die SVE eine Konstruktionszeichnung (Abbildung 3-19) von B+S erstellt.

Im Anschluss daran wurden drei SVE laut Konstruktionszeichnung durch die B+S hergestellt. Abbildung 3-20 zeigt die erste aus Stahl hergestellte SVE. Alle Seiten der SVE wurden mit Hilfe eines Fräsprozesses nachbearbeitet, um höchstmögliche Maßhaltigkeit zu gewährleisten.

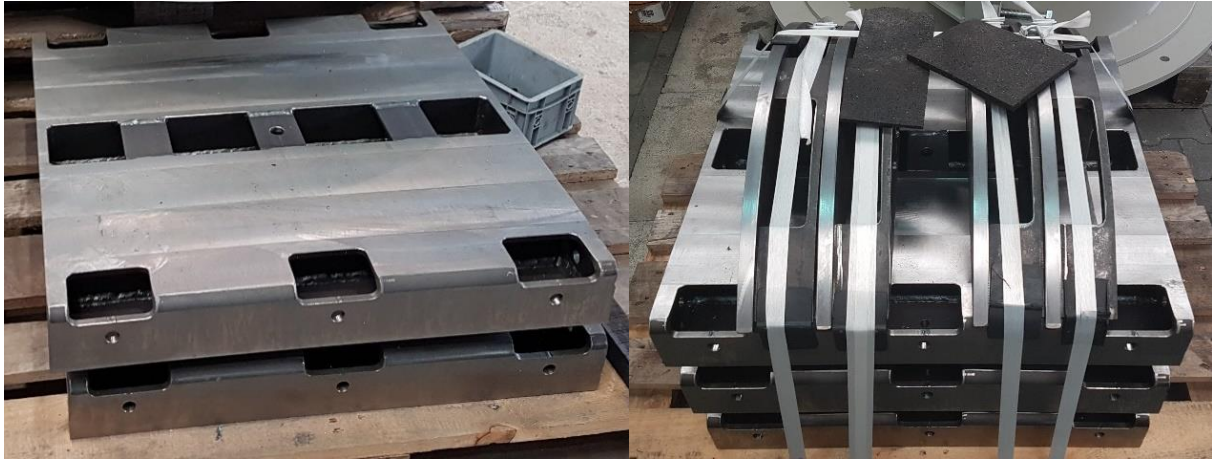


Abbildung 3-20: Zwei SVE, drei SVE mit den Füllstücken als Kreisabschnitte (v. l. n. r.)

Mit Hilfe dieser SVE können in Zukunft Wachsrohlinge in großem Maßstab in der Großpresse bei B+S hergestellt und zu einer Gesamtschalung zusammengesetzt werden.

3.4.2 Verbindungstechniken

Um Gesamtschalungen mittels modularer Teilsysteme zusammenzusetzen, müssen unterschiedliche Verbindungsmittel entwickelt werden, die eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den einzelnen Schalungsmodulen gewährleisten. Bei Standardschalungssystemen (Abbildung 3-15) kommen Schalungsanker und -klemmen zum Einsatz, um einzelne Module zu einer Gesamtschalung zu verbinden. Diese Standard-Verbindungsmittel können einen exakten Aufbau der Gesamtschalung mit einer Maßhaltigkeit von unter 1 mm nicht gewährleisten. Aus diesem Grund wurden in den zuvor entwickelten SVE seitliche Passbohrungen (Abbildung 3-20) vorgesehen, die mit Standard-Passschrauben aus dem Maschinenbau eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den SVE sowie einen exakten Zusammenbau der Gesamtschalung sicherstellen. Abweichend von den Standard-Schalungssystemen, bei denen die Schalhaut in Form einer Holzwerkstoffplatte auf dem Stahlgitterträger dauerhaft verbleibt, wird in dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, die SVE zwar wieder zu verwenden, jedoch den aufgepressten Wachsrohling von der SVE zu trennen und zu recyceln (Abbildung 1-2, D). Durch diese Trennung von Trägereinheit (SVE) und Schalhaut (aufgepresstes Wachs) muss zudem eine reversible Verbindungstechnik entwickelt werden, die es ermöglicht, das aufgepresste Wachs mit der SVE über den Zeitraum der Bearbeitung und der Montage bis hin zur Betonage und Entschalung kraftschlüssig zu verbinden. Im Anschluss daran muss diese Verbindungstechnik eine einfache Trennung zwischen SVE und aufgepresstem Wachsrohling ermöglichen. Ähnliche kraftschlüssige, jedoch reversible Verbindungen aus anderen Fachdisziplinen sind z. B. Schrauben. Im Holz- und Stahlbau können diese eine kraftschlüssige und gleichzeitig reversible Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe sicherstellen. Tastversuche im Forschungsprojekt *Non-Waste-Wachsschalungen* [9] haben gezeigt, dass sich Holzbauschrauben sowie Rampa-Muffen als Verbindungsmittel im gegossenen Wachs eignen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden in Kapitel 4.4 weitere für sinnvoll erachtete Verbindungsmittel in unterschiedlichen Größen hinsichtlich ihrer Eignung untersucht.

3.4.3 Kombination von modularen Wachsschalungen und Systemschalungen

Ein wichtiger Punkt für neue Produkte oder Produktionsverfahren hinsichtlich ihrer Akzeptanz auf dem Markt ist, nicht in den direkten Wettbewerb mit am Markt seit vielen Jahren etablierten großen Herstellern zu treten. Eine *Stand-Alone*-Lösung steht mit der ersten Vermarktung in direkter Konkurrenz zu anderen Herstellern, was ein Risiko hinsichtlich der Etablierung des neuen

Produkts/Produktionsverfahrens birgt. Zielführend ist es, ein Produktionsverfahren zu entwickeln, das eigenständig, jedoch auch als *Add-on* für bestehende am Markt verfügbare Verfahren verstanden werden kann. Durch eine sinnvolle Verbindungstechnik kann es in Zukunft möglich sein, Wachsschalungsmodule mit Standard-Schalungssystemen zu kombinieren, um die Stärken beider Verfahren optimal zu kombinieren. Nicht alle in Zukunft herzustellenden Betonbauteile sind Freiformgeometrien. Vielmehr werden lediglich einzelne Bereiche einer Gesamtgeometrie dem Freiformgedanken entsprechen, sodass nur in diesen Freiformschalungen zum Einsatz kommen. Der Rest der herzustellenden Bauteilgeometrie kann mit Standard-Schalungssystemen eingeschalt werden. Aus diesen Gründen ist eine mögliche Kombination der zu entwickelnden Wachsschalungstechnologie mit Standard-Schalungssystemen für die Markteinführung sowie das Bestehen am Markt erforderlich. Trotzdem kann für spezielle Bauteilgeometrien wie freigeformte Stützen auch ausschließlich auf die Wachsschalungstechnologie zurückgegriffen werden.

3.5 Betonage der Wachsschalungsmodule

Durch die Betonage von Betonbauteilen ergeben sich für die Schalung aus modular zusammengesetzten Wachsschalungsmodulen vier Hauptanforderungen:

Wahl der Betonsorte

Durch stetige Weiterentwicklungen entstehen ständig neue Betonrezepturen für unterschiedlichste Anwendungsgebiete. Hochleistungsbetone [77] wie *ultrahochfester Beton* (kurz UHPC für *Ultra-High Performance Concrete*) [78] oder *Infraleichtbeton* [79] sind nur einige neuartige Betonprodukte, die dem Markt seit kurzem zur Verfügung stehen. Um darzulegen, dass die Wahl der Betonsorte keinen Einfluss auf das erforschte Herstellungsverfahren hat, werden sowohl Normalbetone als auch ultrahochfeste Betone zur Betonage der Demonstrationsbeispiele herangezogen.

Steifigkeit der Schalung:

Die Schalung muss steif genug sein, um dem Frischbetondruck standzuhalten und um sicher zu stellen, dass das herzustellende Betonbauteil auch die geforderte Maßhaltigkeit gewährleistet. Der Beton ist je nach festgelegter Konsistenz sehr steif bis fließfähig. Betone werden nach [80] in sechs Konsistenzklassen bezüglich deren Ausbreitmaß von F1 (sehr steif) bis F6 (flüssig) eingeteilt. Darüber hinaus sind am Markt noch selbstverdichtende Betone (SVB) nach [81] verfügbar, die fließfähiger als die Betone der Konsistenzklasse F6 sind. Durch die unterschiedlichen Konsistenzen der Betone und die daraus resultierende horizontale Druckbelastung auf die Schalung ist der Frischbetondruck ein maßgebender Einflussfaktor hinsichtlich der Maßhaltigkeit der herzustellenden Betonbauteile. Steigt der Frischbetondruck durch hochfließfähige Betone (SVB), steigt auch die Belastung auf die Schalung und die Maßhaltigkeit nimmt ab.

Ausgehend von einer Stützenschalung übt der Frischbetondruck eine über die Schalungshöhe der Stütze veränderliche horizontale flächige Druckkraft (Druckspannung) auf die Schalung aus. Die maximale Druckspannung herrscht bei Vernachlässigung der Wandreibung der Schalung am Fußpunkt der Stütze. Wird von einer 10 m hohen Stützenschalung ausgegangen und diese Schalung mit Wasser gefüllt, herrscht am Fußpunkt eine Druckspannung von 1,0 bar = 0,1 N/mm² (hydrostatischer Wasserdruck einer 10 m hohen Wassersäule). Wird der Druckspannungswert der 10 m hohen Wassersäule mit der durchschnittlichen Dichte von Beton $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3 = 0,000025 \text{ N/mm}^3$ multipliziert, ergibt dies den maximalen Frischbetondruck am Fußpunkt der Stützenschalung. Dieser beträgt $0,000025 \text{ N/mm}^3 \times 10000 \text{ mm} = 0,25 \text{ N/mm}^2$.

Im Vergleich zu den Angaben in der Literatur ist dieser Wert auf der sicheren Seite. Die Norm DIN 18218 *Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen* [82] gibt Aufschluss über die laut Norm anzusetzenden Frischbetondrucke auf lotrechte Schalungssysteme. Da diese Norm speziell für die Betone der Konsistenzklassen F5, F6 und SVB (selbstverdichtender Beton) eine maximale Bauteilhöhe je

Betonierschritt von 6,0 m vorsieht, wird anhand einer Stützhöhe von 5,0 m der zuvor beschriebene Ansatz (hydrostatischer Wasserdruck multipliziert mit der Betondichte) mit der Norm verglichen. In Abbildung 3-21 ist das Diagramm laut Norm abgebildet, anhand dessen der Frischbetondruck durch Festlegung der Einflussfaktoren bestimmt werden kann.

Ein wichtiger Einflussfaktor ist der Erstarrungszeitpunkt, nach dem der Beton seine Grünstandsfestigkeit erreicht hat und die Schalung nicht mehr belastet. Für diesen Vergleich wird das Erstarrungsende des Betons auf 10 h festgelegt. Die Steiggeschwindigkeit wird auf $v = 0,5 \frac{m}{h}$ festgelegt. Laut Abbildung 3-21 beträgt der maximale Frischbetondruck eines SVB-Betons bei einer Stützhöhe von 5 m und einer Steiggeschwindigkeit von $v = 0,5$ $\sigma_{hk,max} = 57 \frac{kN}{m^2}$. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 3-21 auf der gestrichelten Linie (1) der zuvor genannte Ansatz (hydrostatischer Wasserdruck multipliziert mit der Betondichte) aufgetragen.

Dieser Wert ist unabhängig in Bezug auf die Betoniergeschwindigkeit und den Erstarrungszeitpunkt. Hier liegt der theoretische Frischbetondruck mit gleicher Steiggeschwindigkeit $v = 0,5$ bei $\sigma_{hk,max} = 5m \times 25 \frac{kN}{m^3} = 125 \frac{kN}{m^2}$. Dieser Wert liegt weit über den realen Frischbetondrücken. Aus diesem Grund kann diese Annahme für die weiteren Betrachtungen herangezogen werden.

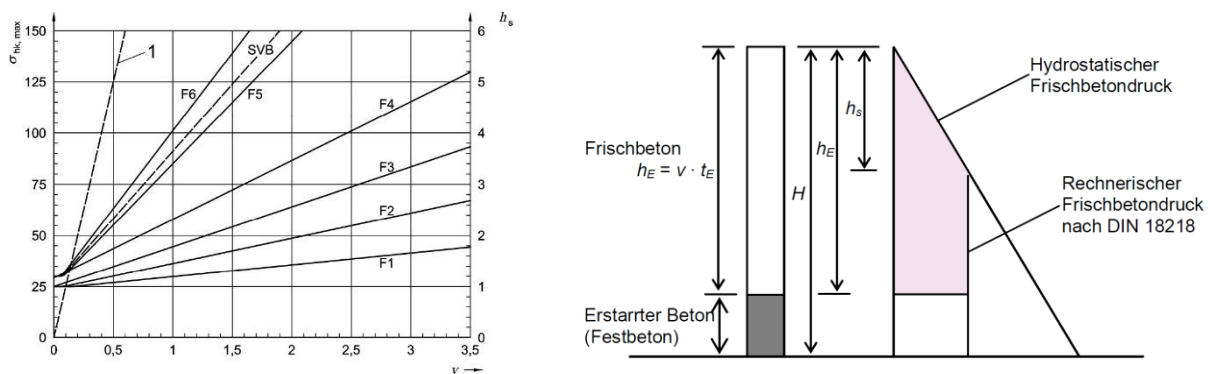


Abbildung 3-21: Diagramm für die Bestimmung des Frischbetondrucks $\sigma_{hk,max}$ in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit v und der Konsistenzklasse bei einem Erstarrungsende t_E von 10 h [82]. Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe gemäß DIN 18218 [82, 83]; v =Steiggeschwindigkeit, t_E =Erstarrungsende, H =Schalungshöhe, h_s =hydrostatische Druckhöhe, h_E =Betonierhöhe bei Erreichen des Erstarrungsendes t_E (v. l. n. r.)

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_F wird laut DIN EN 12812 [84] bei ungünstiger Einwirkung auf $\gamma_F = 1,5$ festgelegt. Daraus ergibt sich ein Bemessungswert des Frischbetondrucks am Fuße einer 10 m hohen Stützenschalung von $\sigma_{hd} = 1,5 \times 0,25 \frac{N}{mm^2} = 0,375 \approx 0,5 \frac{N}{mm^2}$, der als Maßstab für die minimale Druckfestigkeit der Wachsschalung dient. Im Schwerpunktprogramm SPP 1542 *Leicht Bauen mit Beton* wurde am Institut für Massivbau der TU Darmstadt das Teilforschungsprojekt *Frischbetondruck bei freigeformten Schalungssystemen* durchgeführt. Das Ergebnis dieses Forschungsvorhabens war, dass der Ansatz des hydrostatischen Frischbetondrucks zwar zu einer Überdimensionierung des Schalungssystems führt, jedoch auf der sicheren Seite liegt. [85] Somit gilt der Frischbetondruck von $\sigma_{hd} = 0,5 \frac{N}{mm^2}$ als Benchmark für die zu erreichende Druckfestigkeit des Wachses.

Eine weitere Belastung speziell für die Wachsschalung besteht in der Hydratationswärme des Betons, die die Schalung während des Erhärtens des Betons thermisch belastet. Der Zement im Beton bindet während seiner Erhärungsphase Wasser. Diese Reaktion ist ein exothermer chemischer Prozess, bei dem Wärme freigesetzt wird. [86] Diese Freisetzung von Wärme wird als Hydratationswärme bezeichnet und hängt von der jeweiligen Betonrezeptur ab. Betone mit einem hohen Zementanteil setzen mehr Wärme während des Erhärtungsprozesses frei als Betone mit niedrigem Zementanteil. Speziell UHPC entwickelt durch einen hohen Zementanteil eine Hydratationswärme von zum Teil über 70 °C, wohingegen Normalbetone eine Hydratationswärme von lediglich ca. 30 °C erreichen.

Da speziell das CFW, das für die weiterführenden Versuche verwendet wird, bei höheren Temperaturen an Festigkeit verliert, muss untersucht werden, wann die Betone ihre maximale Hydratationswärme während des Erhärtungsprozesses entwickeln, um Rückschlüsse auf die benötigte Festigkeit des Wachses zu ziehen. Nur wenn diese thermische Belastung bekannt ist und vom Wachs aufgenommen werden kann, kann es als neuartiges Schalungsmaterial zielführend angewendet werden, ohne Einschränkungen hinsichtlich der Maßhaltigkeit sowie der einzusetzenden Betone in Kauf nehmen zu müssen. In [9] wurden Untersuchungen hinsichtlich der Hydratationswärmeentwicklung über die Zeit von Normalbeton (C30/37) mit einem mittleren Zementgehalt und UHPC (Nanodur® der Fa. Dyckerhoff) mit einem hohen Zementgehalt durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-22 dargestellt.

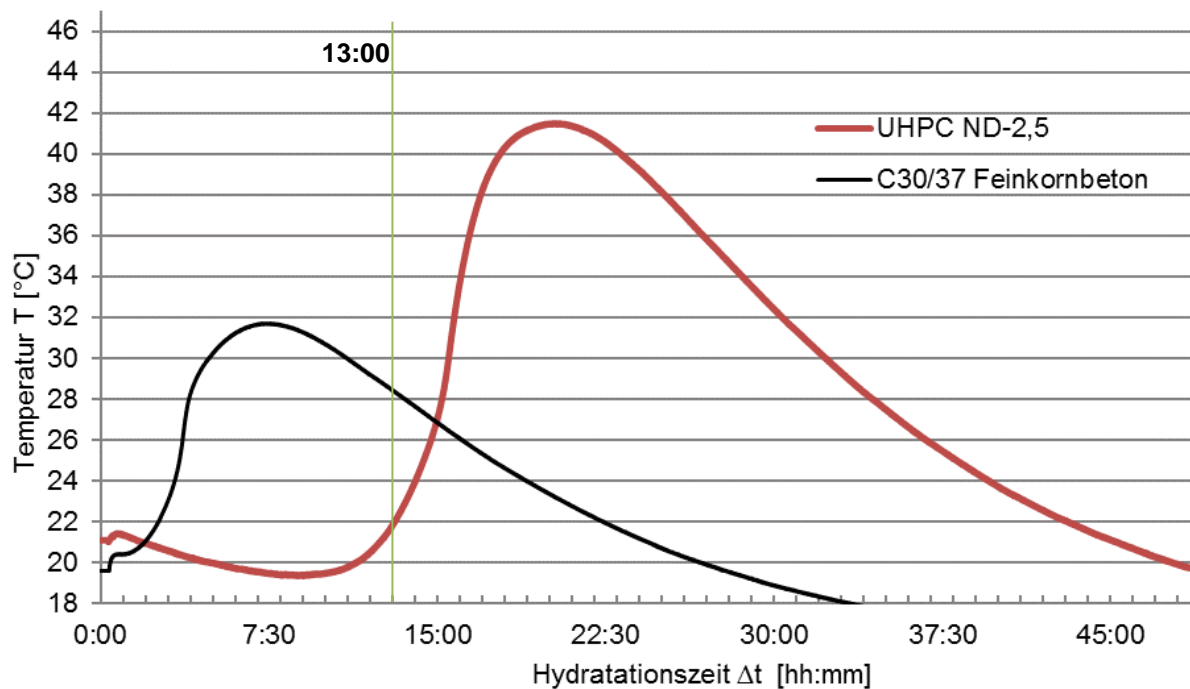


Abbildung 3-22: Temperatur/Hydratationszeit – Diagramme: Versuch am ITE zur Messung der Entwicklung der Hydratationstemperatur an der Zwischenschicht von einem Betonprobekörper (30 x 30 x 30 cm) zu einer umlaufenden 10 cm starken XPS-Isolierschicht, UHPC (Typ UHPC ND-2,5) rot, Normal- bzw. Feinkornbeton C30/37 (etwa. 400 kg/m³ Portland Zement PUR 4 N) schwarz. [9]

In Abbildung 3-22 wird das Verhältnis zwischen Zementanteil im Beton und Hydratationswärme deutlich. Je mehr Zement im Beton ist, desto größer ist die aus der chemischen Reaktion zwischen Wasser und Zement resultierende Hydratationswärme. Zudem ist zu erkennen, dass das Maximum der Hydratationswärme des jeweiligen Betons zu unterschiedlichen Zeitpunkten vorherrscht. Beim Beton mit einem mittleren Zementgehalt wird eine maximale Temperatur von unter 32 °C schon nach sieben Stunden erreicht, wohingegen die maximale Temperatur des Betons mit hohem Zementanteil von unter 42 °C erst nach rund 20 Stunden erreicht wird.

Die Temperaturbelastung des Betons hat jedoch nur solange einen Einfluss auf die Wachsschalung und deren Maßhaltigkeit, solange der Beton noch fließfähig ist und somit Druck auf die Schalung ausübt. Ist der Beton erstarrt, hat dieser seine herzustellende Geometrie vollständig konserviert und etwaige temperaturbedingte Verformungen der Wachsschalung haben keinen Einfluss auf die Bauteilgeometrie und deren Maßhaltigkeit mehr. Aus diesem Grund wurde der verwendete UHPC ND-2,5 einem Knetbeuteltest nach DIN 18218 [82] unterzogen, um das Erstarrungsende des Betons zu untersuchen. Der Test ergab, dass der verwendete UHPC ND-2,5 zum Zeitpunkt $\Delta t = 13$ h des Temperaturanstiegs bereits sein Erstarrungsende erreicht hatte. [9]

In Abbildung 3-22 ist anhand der grünen Linie die Temperatur des Betons beim Erstarrungsende nach 13 Stunden abzulesen. Der Temperaturpeak nach 20 Stunden von 42 °C wirkt sich somit nicht negativ auf die Maßhaltigkeit des herzustellenden Betonbauteils aus, da der Beton schon nach 13 Stunden bei einer Temperatur von rund 20 °C vollständig erstarrt ist. Es muss somit sichergestellt werden, dass das

verwendete Wachsschalungsmaterial bei Temperaturen von 20 °C die gewünschte Festigkeit liefert, um dem Frischbeton standzuhalten und die Maßhaltigkeit zu gewährleisten.

Entschalbarkeit nach der Betonage

Während des Erhärtungsprozesses des Betons entstehen zwischen der Betonoberfläche und der Schalhaut Anhaftungskräfte. Diese lastunabhängigen Kräfte zwischen zwei Materialien treten infolge von chemischen/molekularen Bindungen/Anziehungskräften (Adhäsion) oder mechanischem Formschluss/Verklemmung auf. [87] Sie sind abhängig von den Oberflächenbeschaffenheit und Größe der Oberfläche der Schalhaut sowie der Betonoberflächenstruktur. Eine mechanische Verklemmung tritt bei rauen Schalhäuten auf, in die der Beton *eindringen* und sich somit mechanisch verklemmen kann. Je rauer die Schalhaut, desto größer ist der Anteil der mechanischen Verklemmung an der gesamten Kontaktkraft. Um diesen Anteil der Kontaktkraft möglichst gering zu halten, sind Schalhäute mit glatter Oberfläche zielführend. Die Adhäsion hingegen wirkt auf molekularer Ebene zwischen Molekülen. Die Größe dieser Kraft hängt von der Oberflächengröße ab.

Speziell bei Freiformgeometrien sind die Oberflächengrößen höher als bei geraden und ebenen Bauteilen. Um die Adhäsionskraft zwischen Betonoberfläche und Schalhaut so gering wie möglich zu halten, werden heutzutage speziell auf jedes Schalhautmaterial abgestimmte Trennmittel eingesetzt. Diese werden als dünner Film auf die Schalhaut aufgetragen und stellen hinsichtlich einer möglichen molekularen Wechselwirkung eine Trennschicht dar. In Bezug auf Standardschalhäute aus Holz, beschichtetem Holz oder Kunststoff sind eine Vielzahl unterschiedlicher Trennmittel auf Wasser-, Öl- sowie Wachsbasis am Markt verfügbar. Für das neue Feld der Wachsschalungen sind derzeit keine Trennmittel standardmäßig am Markt erhältlich.

In [9] wurden erste Untersuchungen hinsichtlich geeigneter Trennmittel durchgeführt. Das Ergebnis war, dass sich speziell pastöse Trennmittel auf Wachsbasis für die Anwendung auf Wachsschalungen eignen. Als derzeit am Markt erhältliches Trennmittel auf Wachsbasis hat sich das Trennmittel Ciri LM-33 der Firma GRACE als zielführend für gegossene Schalungskörper aus Wachs erwiesen. Auf Ölbasis hergestellte Trennmittel sind dagegen wegen der Lipophilität (Öllöslichkeit) des Wachses als nicht brauchbar zu betrachten, da das ölhaltige Trennmittel vom Wachs vollständig absorbiert wird.

Die Konsistenz von am Markt verfügbaren Trennmitteln reicht von flüssigen, wässrigen Trennmitteln über ölige und pastöse Mittel bis hin zu festen Wachsen. Hinsichtlich der resultierenden Betonoberfläche sowie der Integration des Auftrags von Trennmitteln in den Herstellungsprozess ist darauf zu achten, dass der Trennmittelfilm so dünn wie möglich auf die Schalhaut aufgebracht wird, um die Maßhaltigkeit der Betonbauteile nicht negativ zu beeinflussen. Zudem muss die Konsistenz auf einen automatisierten Prozess der Beförderung und des maschinellen Auftrags abgestimmt werden.

Dichtigkeit der Schalung

Schalungssysteme, die aus einzelnen Bauteilen modular zusammengesetzt sind, besitzen an den Kontaktflächen zweier Schalungsmodulen Fügestellen oder Fugen, die bei unsachgemäßem Aufbau eine Havarie der Schalung zur Folge haben können. Speziell sehr fließfähige Betone stellen hier bei hohen Schalungen mit erhöhten Frischbetondrücken eine besondere Herausforderung hinsichtlich der Dichtigkeit der Schalung dar, da diese Betone durch kleinste Undichtigkeiten oder Ritze auslaufen können und so das herzustellende Betonbauteil zerstören oder unbrauchbar machen. Vor allem bei der Herstellung der Demonstrationsbeispiele im Projekt ist auf eine saubere Ausbildung der Fugen zwischen den einzelnen Wachsmodulen zu achten sowie eine kraftschlüssige Verbindung zwischen allen für den Aufbau der Schalung notwendigen Modulen zu gewährleisten.

3.6 Rezyklieren der Wachsrohlinge

Ein automatisierter Fertigungsprozess kann sich gegen die derzeit am Markt verfügbaren Herstellprozesse (vgl. 2.1.2) nur durchsetzen, wenn er deutliche Vorteile im Vergleich zu den verfügbaren Herstellungsmethoden aufweist. Diesen Vorteil stellt das nahezu 100-prozentige Recycling des benutzten Schalungsmaterials bei gleichzeitig hoher Formfreiheit in einem automatisierten Prozess dar. Im Fertigteilwerk werden heutzutage die Formseitenteile (Abbildung 2-14), die Stahlpaletten sowie die Stahlschalungen (Abbildung 2-16) oft wiederverwendet. Auch Standardschalungen zur Herstellung von geraden Ortbetonwänden besitzen eine hohe Wiederverwendungsrate. Es müssen jedoch Einschränkungen hinsichtlich der Formfreiheit akzeptiert werden. Soll ein Verfahren eine hohe Formfreiheit besitzen (vgl. Abbildung 2-11, Abbildung 2-26, Abbildung 2-28) wird derzeit in Kauf genommen, dass das verwendete Schalungsmaterial durch die Trennmittelbeschichtung kaum wiederverwendet werden kann und kostenintensiv entsorgt werden muss. Aus den zuvor genannten Gründen stellt ein automatisierter Prozess, der hohe Formfreiheit und gleichzeitig eine hohe Wiederverwendungsrate des Schalungsmaterials ermöglicht, ein Alleinstellungsmerkmal am Markt dar. Um dieses Ziel zu erreichen, muss ein Recycling-Prozess entwickelt werden, der es ermöglicht, die gepressten und benutzten Wachsrohlinge zu zerkleinern, um die so erzeugten Späne in den Pressprozess vollständig zurückführen zu können (Abbildung 1-2 – D).

3.6.1 Zerkleinern von Stoffen

Zerkleinern von Stoffen bedeutet, dass die Partikelgröße des Ausgangsmaterial durch geeignete Zerkleinerungsmaschinen verringert wird, um bestimmte Eigenschaften des Materials hinsichtlich einer weiterführenden Verarbeitung zu erhalten oder spezielle Anforderungen zu erfüllen. Das Zerkleinern von Stoffen kann in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

- Beanspruchungsart I: Zerkleinern durch den Einsatz eines Zerkleinerungswerkzeuges
- Beanspruchungsart II: Zerkleinern durch den Einsatz von mindestens zwei Zerkleinerungswerkzeugen

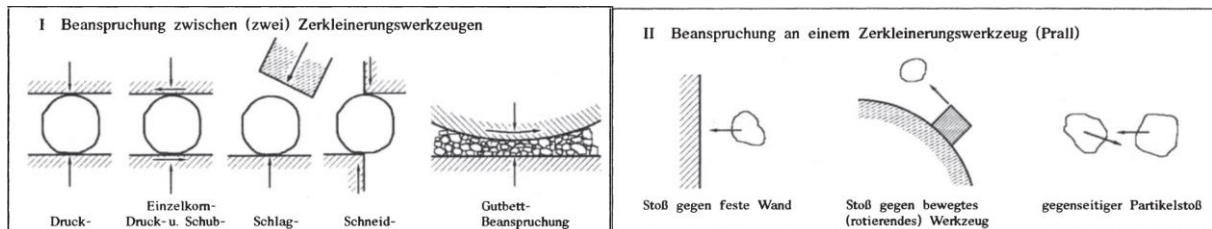


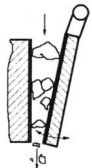
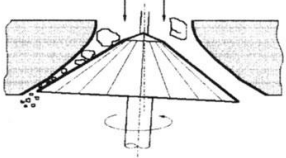
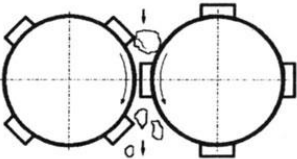
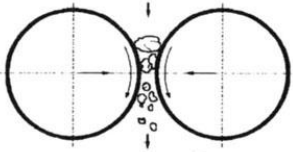
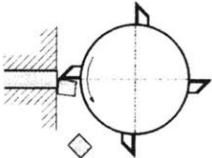
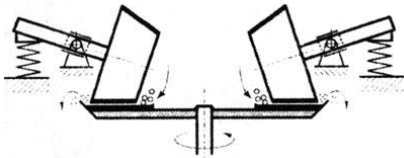
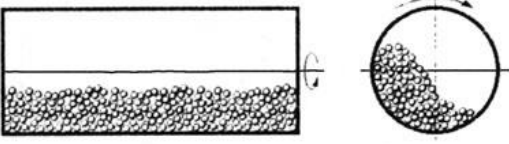
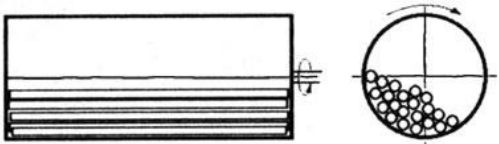
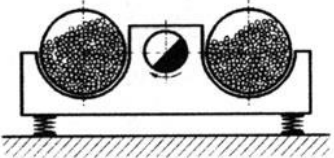
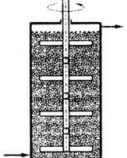
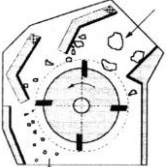
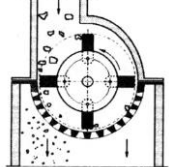
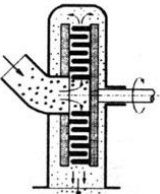

Abbildung 3-23: unterschiedliche Beanspruchungsarten nach Rumpf [88, 89]

Im Allgemeinen wird bei der Zerkleinerung von Stoffen je nach der Größe des Aufgabegutes zwischen Brechen und Mahlen unterschieden. Beim Brechen werden Stoffe mit einem Aufgabegut von 1 m bis 10 mm zerkleinert, wohingegen beim Mahlen das Aufgabegut Größen zwischen 10 mm bis 1 μ m entspricht.

Da das Zerkleinern von Stoffen in unzähligen Industriezweigen und Branchen Anwendung findet, sind über die Jahre auch eine Vielzahl unterschiedlicher Zerkleinerungsmaschinen entwickelt worden, um den jeweiligen Bedürfnissen der einzelnen Branchen hinsichtlich des Aufgabeguts, dessen Größe sowie der gewünschten Zielkorngröße gerecht zu werden. In Tabelle 3-6 sind die gängigsten Zerkleinerungsmaschinen dargestellt.

3. Definition der Prozessschritte der automatisierten Herstellung von individuellen Betonbauteilen

Tabelle 3-6: Darstellung der Wirkungsweise unterschiedlicher Zerkleinerungsmaschinen [89]

Darstellung der Wirkungsweise unterschiedlicher Zerkleinerungsmaschinen	
<p>Backenbrecher</p> 	<p>Rundbrecher</p> 
<p>Walzenbrecher</p> 	<p>Walzenmühle</p> 
<p>Schneidmühle</p> 	<p>Wälzmühle (Rollenmühle)</p> 
<p>Kugelmühle</p> 	<p>Stabmühle</p> 
<p>Schwingmühle</p> 	<p>Rührwerksmühle</p> 
<p>Prallbrecher</p> 	<p>Hammerbrecher, Hammermühle</p> 
<p>Prallmühle (Stiftmühle)</p> 	<p>Strahlmühle</p> 

3. Definition der Prozessschritte der automatisierten Herstellung von individuellen Betonbauteilen

Die Einsatzbereiche der einzelnen Zerkleinerungsmaschinen ergeben sich auf Basis der folgenden Kriterien:

- Korngröße des Aufgabeguts
- Mahlguteigenschaften des Aufgabeguts
- Zielkorngröße

In Abbildung 3-24 sind Kriterien wie der Korngrößenbereich und die Mahlguteigenschaften mit den jeweiligen Einsatzspektren der unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen dargestellt.

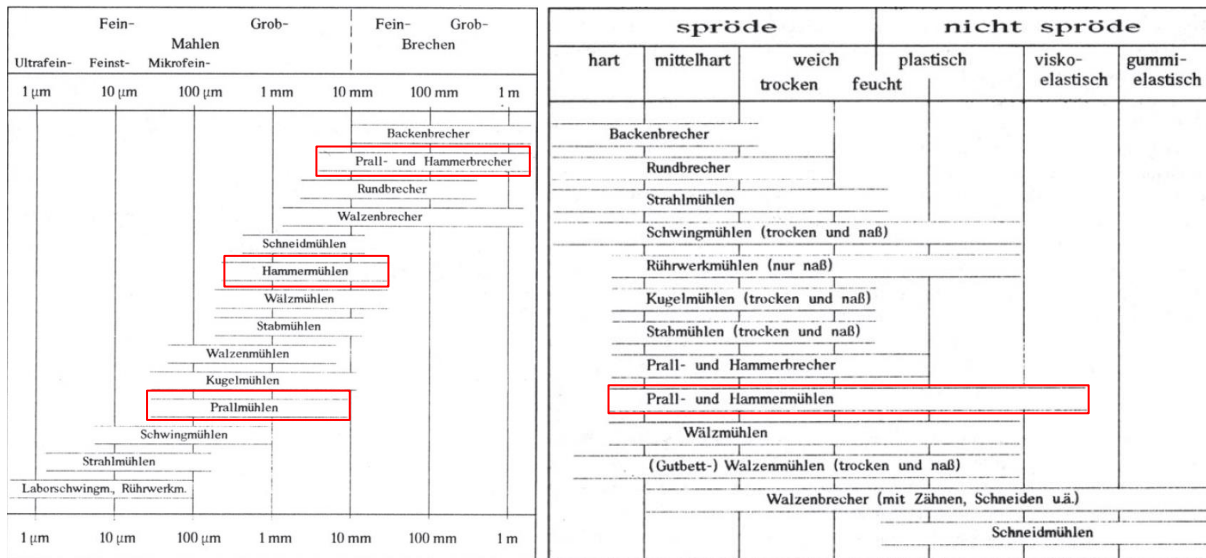


Abbildung 3-24: Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen nach Korngrößenbereichen des Aufgabegutes, Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen nach Mahlguteigenschaften (v. l. n. r.) [89]

Es wird deutlich, dass unterschiedliche Zerkleinerungsmaschinen unterschiedliche Kriterien bedienen können, jedoch gibt es keine Maschine, die das gesamte Spektrum hinsichtlich der Mahlguteigenschaften oder der Aufgabegutgröße abdeckt. Wird das Ziel verfolgt, Korngrößen mit Abmessungen im Meterbereich in Pulver zu zermahlen, müssen mehrere aufeinander abgestimmte Zerkleinerungsmaschinen in Reihe geschaltet werden, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Ähnlich verhält es sich mit den Mahlguteigenschaften.

Ein weiterer wichtiger Punkt in Bezug auf ein wirtschaftliches Zerkleinern von Stoffen ist die Effektivität von Zerkleinerungsmaschinen (Tabelle 3-7). Am Beispiel einer Einzelkornzerteilung (Korngröße 10 mm) wird ein Bezugswert geschaffen, der das Optimum für diesen Vergleich darstellt. Es wird die Energie gemessen, die benötigt wird, um mit der jeweiligen Zerkleinerungsmaschine die gleiche Korngrößenreduzierung zu erreichen. Zerkleinerungsmaschinen des Typs *Brecher* besitzen einen hohen Wirkungsgrad, da die Energie, die zum Zerkleinern notwendig ist, durch Druckbeanspruchung direkt auf das Korn einwirkt. Im Gegensatz dazu wird bei der Prallzerkleinerung viel Energie in Form von Reibung und zur Beschleunigung des Mahlguts verbraucht. Anhand von Tabelle 3-7 wird deutlich, dass mit zunehmend feiner werdenden Zielkorngrößen die Effektivität des Mahlprozesses sinkt. [89]

Tabelle 3-7: Effektivität von Zerkleinerungsmaschinen nach deren Beanspruchungsarten [89, 90]

Einzelkornzerkleinerung (Bezugswert)		100 %
Walzen-, Backen-, Rundbrecher	Beanspruchungsart I	70-100 %
Prallbrecher und -mühlen	Beanspruchungsart II	25-40 %
Hammermühlen	Beanspruchungsart II	17-25 %
Walzenmühlen	Beanspruchungsart I	7-15 %
Kugelmühlen	Beanspruchungsart I	6-9 %
Rührwerksmühlen	Beanspruchungsart I	2-6 %
Strahlmühlen	Beanspruchungsart II	1-2 %

3.6.2 Zielführende Mühlen und deren Eigenschaften

Um im automatisierten Prozess Wachs zielführend zu zerkleinern, müssen die in 3.6.1 beschriebenen Kriterien für das Wachs festgelegt werden. Wachs als Material liegt mit seinen Materialeigenschaften laut Abbildung 3-24 zwischen *spröde-weich* und *nicht spröde – plastisch* oder *nicht spröde – viskoelastisch*. Die Anforderungen an das Aufgabegut unterteilen sich prozessbedingt in zwei Disziplinen. Zum einen muss der gebrauchte Wachsrohling (Durchmesser 1000 mm, Abbildung 4-5 links) zu Spänen zerkleinert werden, um wieder dem Pressprozess zugeführt werden zu können. Zum anderen müssen die vom Hersteller lieferbaren Wachspellets (Durchmesser ca. 5 mm, Abbildung 5-13 rechts) zu Spänen weiterverarbeitet werden können. Diese unterschiedlichen Aufgabegutgrößen stellen eine große Herausforderung für die Zerkleinerungsmaschine dar. Diese kann die Aufgabegüter nicht gleichzeitig zur gewünschten Zielkorngröße zerkleinern. Aus diesem Grund wird im automatisierten Prozess der Ansatz verfolgt, zwei in Reihe geschaltete Zerkleinerungsmaschinen zu nutzen, um beiden Aufgabegutgrößen gerecht zu werden und ständig gleichbleibende Wachsspangrößen im Pressprozess zu gewährleisten.

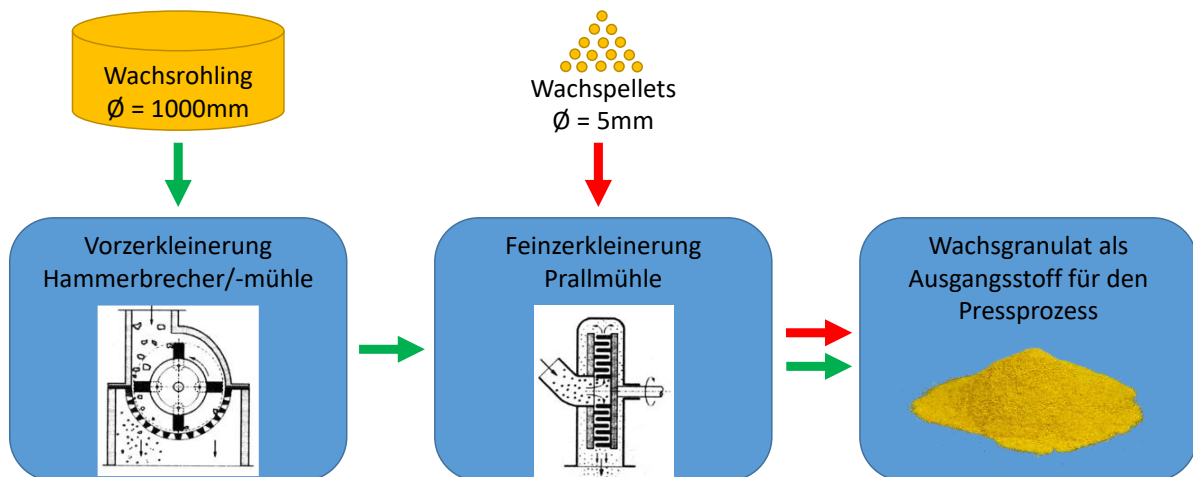


Abbildung 3-25: Schematische Darstellung der zwei Teilrecyclingprozesse

Aus den zuvor beschriebenen Kriterien werden im zweistufigen Zerkleinerungsprozess für die Vorzerkleinerung ein Hammerbrecher, evtl. eine Hammermühle und im zweiten Zerkleinerungsschritt eine Prallmühle verwendet. Beide Zerkleinerungsmaschinen besitzen die Eigenschaft, Wachs mit dessen speziellen Mahlguteigenschaften sowie die jeweiligen Aufgabegutgrößen zielführend zu zerkleinern (vgl. Abbildung 3-24). Auch die hohe Effektivität beider Maschinen (Tabelle 3-7) ermöglicht einen wirtschaftlichen Teilprozess, was sich wiederum positiv auf den Gesamtprozess auswirkt. Lediglich die Walzen-, Backen- und Rundbrecher besitzen eine noch höhere Effektivität, kommen aber

aufgrund der Mahlguteigenschaften von Wachs und der kleinen Zielkorngröße für diesen Teilprozess nicht in Betracht.

Hammerbrecher/-mühle

Hammerbrecher dienen der Grobzerkleinerung von unterschiedlichen Stoffen. Sie besitzen einen Rotor, der sich mit hoher Geschwindigkeit in der Mitte des Gehäuses dreht. Am Rotor befinden sich längs pendelnd aufgehängte Hämmer, die in Rotation versetzt werden. Durch die Fliehkraft richten sich die Hämmer radial nach außen aus, können aber bei nicht mahlbarem Aufgabegut ausweichen und so die Maschine vor Überlastung schützen. Die Hämmer zerschlagen zum einen das Aufgabegut beim ersten Kontakt und beschleunigen zeitgleich die Partikel, sodass diese mit anderen Partikeln oder mit der Wandung oder anderen Bauteilen im Brecher kollidieren und weiter zerkleinert werden. Im unteren Teil des Hammerbrechers ist ein Siebrost verbaut, der die obere Begrenzung der Zielkorngröße darstellt. Nur Partikel, die kleiner sind, fallen durch. Sind die Partikel zu groß, um durch das Sieb zu fallen, verbleiben sie so lange in der Hammermühle und werden weiter zerkleinert, bis sie klein genug sind, um durch das Sieb zu gelangen. Hammerbrecher eignen sich besonders für die Zerkleinerung von weichem bis mittelhartem Aufgabegut. Sie besitzen im Vergleich zu anderen Zerkleinerungsmaschinen ein kleines Bauvolumen und geringen spezifischen Arbeitsaufwand. Sie sind in unterschiedlichen Baugrößen verfügbar und lassen sich fast beliebig auf unterschiedliche Anwendungsgebiete skalieren. Die Brecher haben einen Durchsatz von 0,1-400 t/h, eine Umfangsgeschwindigkeit von 20-60 m/s und einen spezifischen Arbeitsbedarf von 0,6-2 kWh/t. [89]

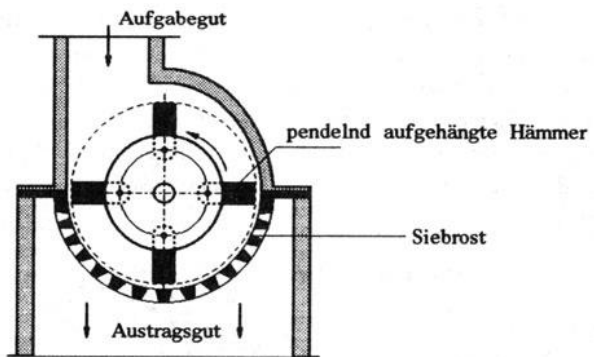


Abbildung 3-26: schematische Darstellung des Querschnitts eines Hammerbrechers mit Siebrost [89]

Prallmühle/Stiftmühle

Prallmühlen, hier speziell Stiftmühlen, zerkleinern das Aufgabegut nach einem ähnlichen Prinzip, wie der/die Hammerbrecher/-mühle, sind jedoch für die Feinzerkleinerung von Stoffen bestimmt. Lediglich die Umfangsgeschwindigkeiten sind aufgrund des kleineren Aufgabeguts und einer feinen Zielkorngröße höher. Bei dieser Bauart stehen sich eine rotierende (Rotor-Stiftscheibe) und eine statische Scheibe (Stator-Stiftscheibe) gegenüber. Auf beiden Scheiben sind konzentrisch angeordnete Stiftreihen in Form von Kreisen aufgeschweißt. Das Aufgabegut wird in Höhe der Mittelachse des Rotors horizontal aufgebracht und außen am Gehäuse radial entnommen. Ähnlich wie beim Hammerbrecher wird es durch den Kontakt mit den in Rotation befindlichen Stiften im Inneren der Stiftmühle beschleunigt, kollidiert wiederum mit anderen Partikeln oder mit der Wandung der Maschine und zerbricht in kleinere Partikel. Die Partikel verbleiben so lange in der Mühle, bis die Zielkorngröße erreicht ist. Durch die Anzahl der Stifte auf den Scheiben, deren Abstand zueinander und deren Rotationsgeschwindigkeit kann die Feinheit der Zielkorngröße beeinflusst werden. Die Umlaufgeschwindigkeit dieser Mühlen beträgt 60 m/s-170 m/s und sie finden in der chemischen, pharmazeutischen und in der Nahrungsmittelindustrie Anwendung. [89]

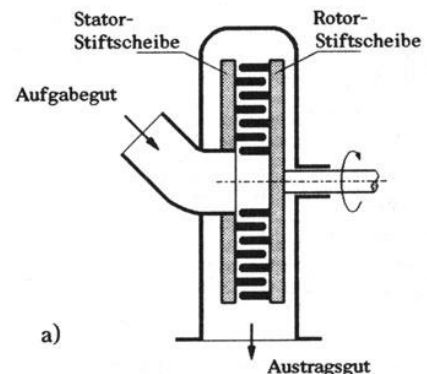


Abbildung 3-27: schematische Darstellung des Querschnitts einer Stiftmühle [89]

4 Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

4.1 Eigenschaften des verwendeten Wachses

Bei dem in den späteren Versuchen verwendeten Material handelt es sich um eine Wachs-Nichtwachs-Mischung, die von der CETECE GmbH unter dem Handelsnamen *ConFormWax* (kurz CFW) hergestellt wird. *ConFormWax* steht dabei für *Concrete Formwork Wax* [10] und bezeichnet ein Wachs, das speziell für die Herstellung von Wachsschalungen entwickelt wurde. Im Produktdatenblatt (Anhang A) des Wachses sind die CAS-Nummern der einzelnen Wachskomponenten aufgeführt. Bei einer CAS-Nummer handelt es sich um eine spezifische Registrierungsnummer, die jedem chemischen Stoff zugeteilt wird. [91] Folgende Stoffe werden im ConFormWax verwendet:

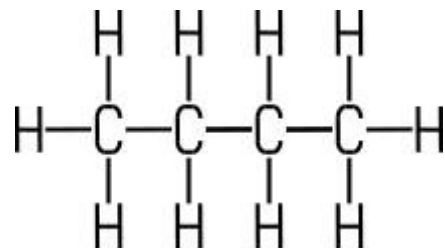
- Carnaubawachs Typ 1 (CAS 8015-86-9)
- Ethylen-Vinylacetat-Copolymer (CAS 24937-78-8)
- Paraffinwachs (CAS 64742-51-4)
- Polycyclopentadiene (CAS 68132-00-3)

Beim zweiten und vierten Stoff handelt es sich um Nicht-Wachs-Komponenten. Wie hoch der Anteil der jeweiligen Komponenten ist, fällt unter das Firmengeheimnis und konnte von der Herstellungsfirma nicht bekanntgegeben werden. Um einen Überblick über die Eigenschaften des verwendeten Wachses zu bekommen, werden zunächst die Eigenschaften und Einflüsse der einzelnen Komponenten genauer betrachtet.

Carnaubawachs wird von der Fächerpalme gewonnen, die hauptsächlich in tropischen und subtropischen Gebieten zu finden ist. Durch Reinigungsverfahren können mehrere Carnaubawachssorten hergestellt werden, die sich wiederum in sieben verschiedene Typen unterteilen. Die Unterschiede in den physikalischen und chemischen Eigenschaften der einzelnen Typen sind allerdings gering. Carnaubawachs Typ 1 hat seinen Erstarrungspunkt zwischen 80 °C und 81 °C. Es ist ein natürliches Wachs mit großer Härte und hohem Erstarrungspunkt. Deshalb wird es oft mit anderen Wachsen vermischt, um deren Härte und Schmelzpunkt zu erhöhen. Der Schmelzpunkt eines Paraffinwachses kann beispielsweise durch den Zusatz von 2,5 % Carnaubawachs von 54,4 °C auf bis zu 76,6 °C steigen. Die Rohdichte von Carnaubawachs liegt bei 15 °C bei 0,99 g/cm³ bis 1,00 g/cm³. [92]

Ethylen-Vinylacetat-Copolymer, im folgenden **EVAC** genannt, ist ein Copolymer aus Ethen (einfachstes Alken mit der Summenformel CH₂=CH₂) und Vinylacetat (Essigsäureester mit der Summenformel CH₃(C=O)-O-CH=CH₂). Das bedeutet, dass sich Ethan und Vinylacetat zu Polymeren zusammenfügen. Diese Polymere verbinden sich dann wiederum in verschiedener Anzahl zu einem Copolymer. Wenn der Anteil an Vinylacetat weniger als 20 % beträgt, sind die technischen Eigenschaften mit denen von Polyethylen, also einem thermoplastischen Kunststoff, vergleichbar. Bei Anteilen von über 20 % werden die Eigenschaften zunehmend kautschukähnlich. [50, 93] Wachse mit einem EVAC-Gehalt von 13 % bis 16 % haben einen Erstarrungspunkt zwischen 80 °C und 90 °C. Die Rohdichte liegt bei 0,93 g/cm³ bis 0,95 g/cm³. In Kombination mit Wachs erhöht EVAC vor allem die Elastizität. [94]

Paraffine bestehen aus gesättigten Kohlenwasserstoffketten. *Gesättigt* bedeutet, dass die vorhandene Anzahl von C-Atomen an die größtmögliche Anzahl von H-Atomen gebunden ist. Dies soll am folgenden Beispiel verdeutlicht werden. Die äußeren beiden C-Atome sind jeweils an drei H-Atome gebunden, alle weiteren an zwei.



Das abgebildete n-Butan ist ein n-Paraffin. Das *n* steht dabei für *normal* und bedeutet, dass die C-Atome geradkettig angeordnet sind (möglich wären zum Beispiel auch cyclische Anordnungen, wie sie im mikrokristallinen Paraffin zu finden sind). Heute wird

Abbildung 4-1: Strukturformel von n-Butan [95]

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

für Kohlewasserstoffketten im Allgemeinen der Begriff *Paraffin* nicht mehr verwendet. Stattdessen wird von Alkanen gesprochen. Als Paraffine werden nur noch Stoffe aus Wasserstoffketten bezeichnet, die aus Rückständen der Destillation von Erdöl oder Braunkohle entstehen und mehr als 20 C-Atome besitzen. Die Schmelztemperatur von Alkanen steigt mit der Anzahl ihrer C-Atome. [50, 95]

Das im später verwendeten Wachs enthaltene Paraffin besteht hauptsächlich aus unverzweigten Kettenparaffinen mit einer Anzahl von 20 bis 50 C-Atomen. Es wird aus Erdöl hergestellt und mit Wasserstoff behandelt. Sein Erstarrungspunkt liegt bei 56 °C bis 58 °C. [96] Damit handelt es sich um ein Hartparaffin. Die Rohdichte liegt zwischen 0,75 g/cm³ und 0,8 g/cm³. [97]

Über **Polycyclopentadiene** sind kaum Eigenschaften bekannt. Es handelt sich dabei um ein ringförmiges Molekül. Im Allgemeinen haben Wachse, in denen Ringsysteme vorliegen, eine höhere Dichte. Ob das Polycyclopentadiene im ConFormWax für eine höhere Dichte sorgt, ist nicht bekannt. [92] Aus diesem Molekül hergestellte Kunststoffe weisen hohe Festigkeiten auf. Bei Kosmetikprodukten wird es zur Regulierung der Viskosität verwendet. [98] Informationen zum Erstarrungspunkt oder zu sonstigen Einflüssen auf Wachs-Mischungen sind in den zugänglichen Quellen nicht zu finden.

Dem Produktdatenblatt kann entnommen werden, dass die verwendete Wachsmischung eine Rohdichte von 0,95 g/cm³ aufweist und dass ihr Tropfpunkt bei 60 °C bis 100 °C liegt.

4.2 Die physikalischen Eigenschaften von ConFormWax für die automatisierte Fertigung

Um Wachs zielführend als Schalungsmaterial einsetzen zu können, muss es gewisse physikalische Eigenschaften aufweisen, um äußeren Belastungen wie dem Frischbetondruck etc. standzuhalten und die Maßhaltigkeit zu gewährleisten. Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, hat der Frischbetondruck direkten Einfluss auf die Maßhaltigkeit der herzustellenden Betonbauteile. Um diese zu gewährleisten, muss der Benchmark der Druckfestigkeit von $\sigma_{hd} = 0,5 \frac{N}{mm^2}$ bei möglichst geringer Verformung eingehalten werden. Schalungssysteme werden jedoch nicht rein auf Druck belastet, sondern müssen weiteren Belastungsarten wie Schub und Biegung standhalten. Da jedoch der gepresste Wachsrohling kraftschlüssig mit der Stahlverbindungseinheit verbunden ist, wird die Annahme getroffen, dass er durch Druckbeanspruchung die vom Frischbetondruck verursachten Belastungen direkt an die Stahlverbindungseinheit weiterleitet und etwaige zusätzliche Belastungen wie Schub und Biegung von der massiven Stahlverbindungseinheit aufgenommen werden (Abbildung 4-2, Abbildung 3-20). Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel lediglich die unterschiedlichen Druckfestigkeiten der gepressten Wachsrohlinge untersucht.

Die Pressbarkeit von Wachsgrenulat in formstabile Körper lässt sich auf zwei wesentliche Parameter zurückführen: zum einen die Temperatur der Wachsspäne, bei der diese in Form gepresst werden, und zum anderen die Presskraft, mit der die Wachsspäne zusammengepresst werden. Um die optimalen Prozessparameter (Temperatur, Druckkraft, Fräsparemeter, Spanzusammensetzung usw.) beim Pressen und Fräsen des Waxes frühzeitig zu ermitteln, wurden zwei kleinformative, hoch präzise Pressformen nach Vorentwürfen des ITE durch die B+S GmbH gefertigt und dem Institut für weitergehende Versuche bereitgestellt (Abbildung 4-3). Mit diesen Pressformen sollen die Ergebnisse aus ersten Tastversuchen in einer Vielzahl von unterschiedlichen Testreihen mit größeren Prüfkörpern weitergeführt werden.

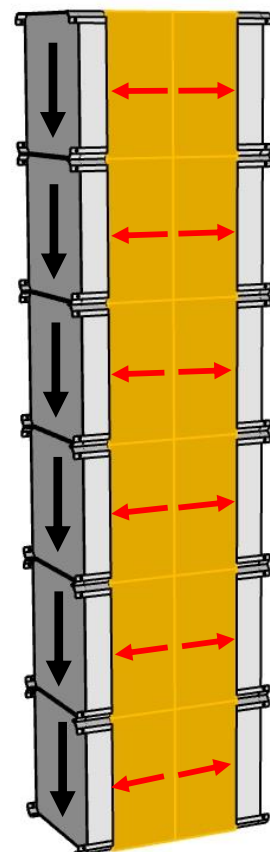


Abbildung 4-2: Prinzip gestapelter Wachs-Schalungsmodule als Stützenschalung. Rot: Druckbelastung der Wachsrohlinge durch den horizontal angreifenden Frischbetondruck; Schwarz: Lastabtrag der Stahlverbindungsmodule

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

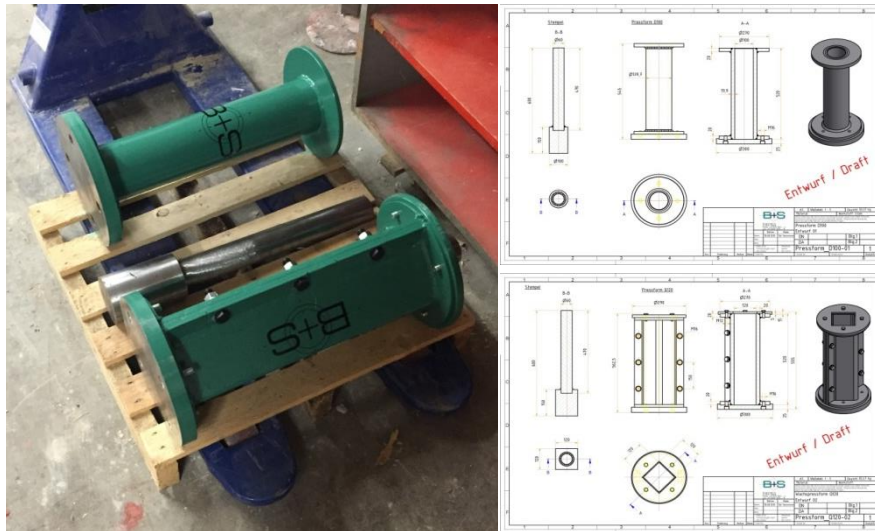


Abbildung 4-3: Pressformen für zylindrische ($\varnothing = 100 \text{ mm}$, $h = 500 \text{ mm}$) und quadratische Probekörper ($a/b = 120/120 \text{ mm}$, $h = 500 \text{ mm}$); Konstruktionszeichnungen der beiden Pressformen von B+S (v. l. n. r.)

Diese wissenschaftlichen Versuchsreihen sollen Aufschlüsse über das Verhältnis von benötigter Presskraft und verschiedenen Temperaturen, sinnvollen Granulat-/Spangrößen sowie eventuellen Lufteinschlüssen beim Pressvorgang geben.

Die Untersuchungen, die notwendig sind, um die physikalischen Eigenschaften von gepresstem Wachs zu erforschen, werden drei übergeordnete Themengebiete zugeordnet:

- Versuche zum Einfluss der Spangröße
- Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur und der Presskraft auf die Druckfestigkeit
- Weiterführende Untersuchungen

In Abbildung 4-4 ist der Versuchsablauf in diesem Kapitel schematisch dargestellt. Nach der Durchführung der jeweiligen Versuche in einem Themengebiet werden die Erkenntnisse daraus für die nächsten Versuche verwendet und zielführende Einflussparameter werden festgelegt, da aus zeitlichen Gründen nicht in jeder Versuchsreihe alle Einflussparameter unabhängig voneinander untersucht werden können. Ziel der in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen ist es, für einen vollautomatisierten Herstellungsprozess zielführende Prozessparameter festzulegen, die die technischen und ökologischen Anforderungen (vgl. 1.3) erfüllen.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

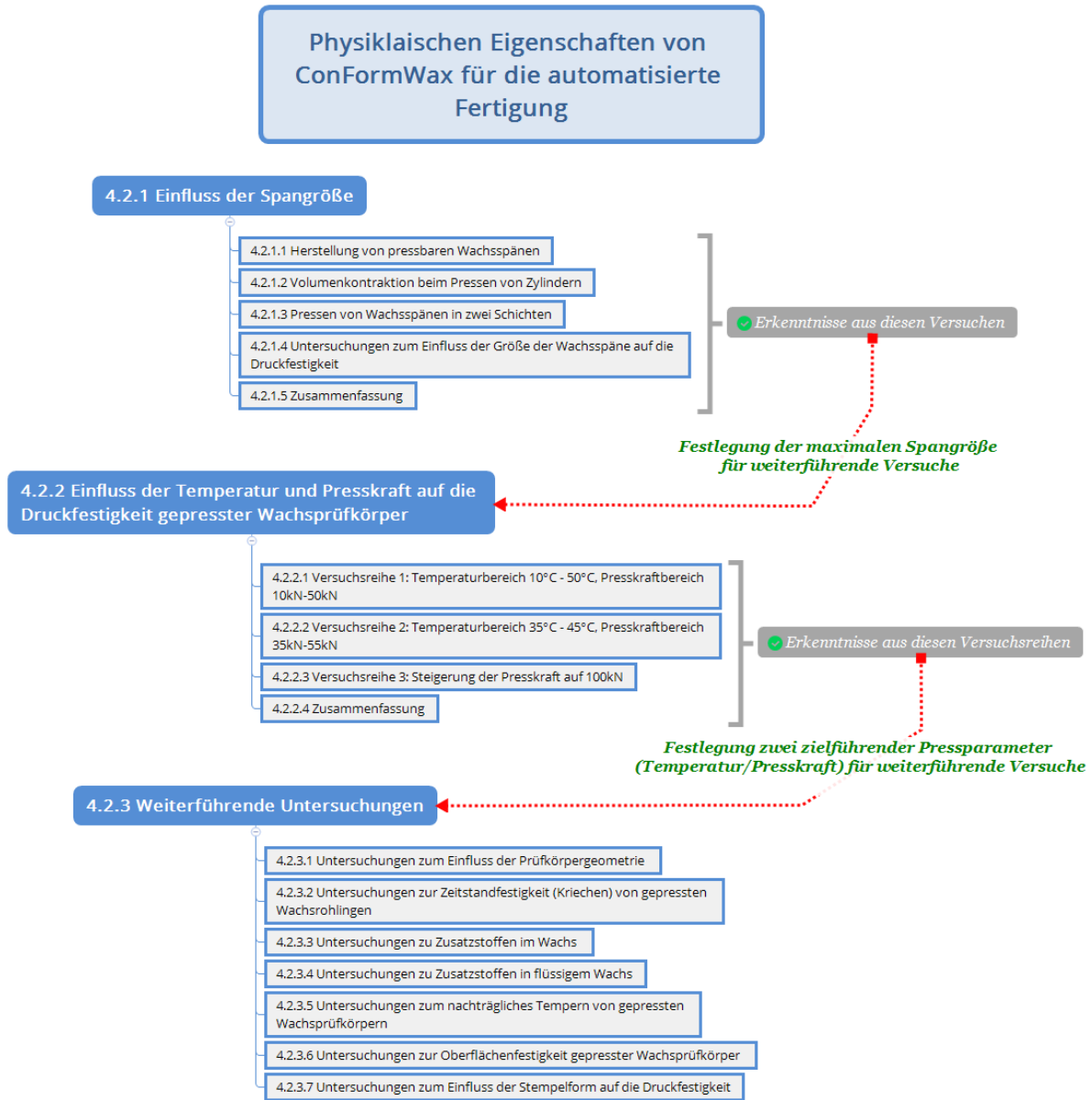


Abbildung 4-4: Flowchart-Darstellung der durchgeführten Versuche hinsichtlich der Druckfestigkeit

Um in den folgenden Versuchen die Probekörper unterscheiden zu können, wird eine Beschriftung der Wachsprükörper festgelegt.

Auf jedem Probekörper werden folgende Angaben markiert:

- Temperatur der Wachsspäne bei der Herstellung (T)
- Druckkraft im Pressprozess (D)
- Proben-/Versuchstypnummer (#)/ggfls. Zusatzstoff/Größtkorn

Beispielhaft für den Probekörper Nr. 1, bei dem die Späne auf 20 °C erwärmt werden und eine Druckkraft von 40 kN (~4 Tonnen) aufgebracht wird, ergibt sich folgende Bezeichnung: *T20 D4 #1*

4.2.1 Einfluss der Spangröße

4.2.1.1 Herstellung von Wachsspänen

Das ConFormWax® (CFW) wird vom Hersteller in zwei Formen produziert und vertrieben. CFW ist in Pastillenform als Sackware (Abbildung 4-5 links) sowie in Tafelform (Abbildung 4-5 rechts) erhältlich. Die Pastillen sind rund mit einem Durchmesser von ca. 4-5 mm. Die Wachstafeln haben eine Größe von ca. 600/300/50 mm.

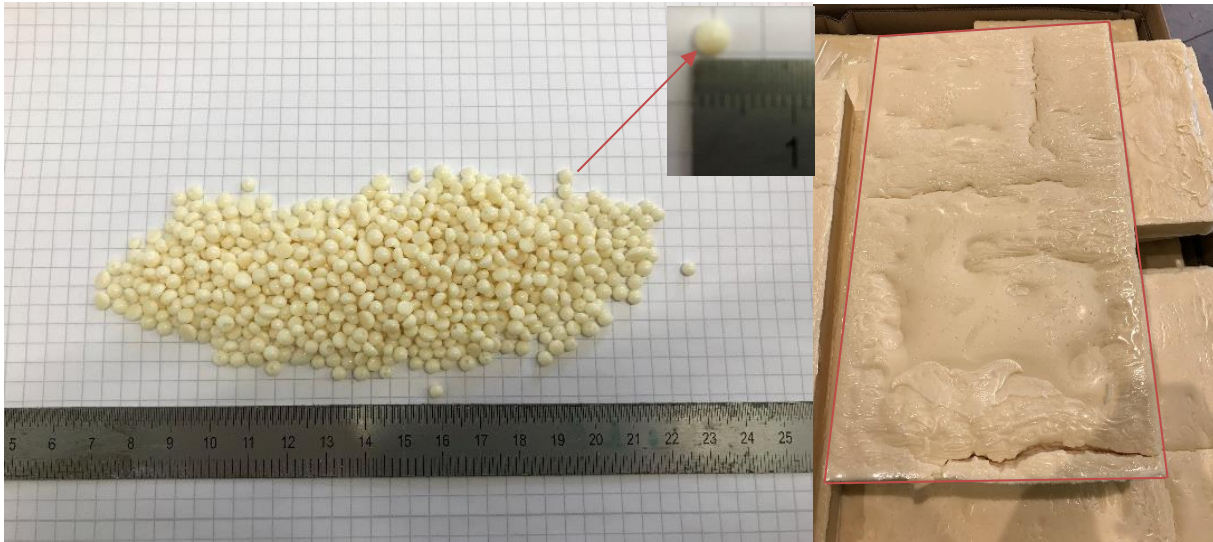


Abbildung 4-5: Lieferform der Pastillen; Lieferform der Tafeln (v. l. n. r.)

Da zum einen derzeit vom Hersteller kein pressbares Material in Form von Spänen lieferbar ist und der Recycling-Prozess zu Beginn des Forschungsprojekts noch nicht erforscht war, bestand zu Beginn des Forschungsprojekts die Herausforderung, aus dem lieferbaren Wachsmaterial pressbare Späne zu erzeugen. Es musste eine einfache Methode entwickelt werden, um das Wachsmaterial ausgehend von der am Markt verfügbaren Lieferform in pressbare Späne zu zerkleinern. Im schon zuvor erwähnten DFG-geförderten Grundlagenforschungsprojekt wurden durch Zerspanung verschiedenster gegossener Wachsböcke Späne erzeugt. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurden die Wachstafeln zu einem Wachspaket zusammengespant und mit Hilfe des sich am ITE seit 2016 in Betrieb befindlichen Großgeräts DBFL zerspannt. Abbildung 4-6 zeigt links den aus Wachstafeln zusammengespanten Block und rechts den zerspannten Wachsblock und Wachsspäne.



Abbildung 4-6: Zusammengespannter Block aus Wachstafeln; zerspanter Wachsbblock und Wachsspäne (v. l. n. r.)

Um die durch den Zerspanungsprozess entstandenen Wachsspäne klassifizieren und mit späteren Zerkleinerungsversuchen im Recycling-Prozess vergleichen zu können, wurden die Späne in Anlehnung an das Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen [99] durch

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Siebung mit immer kleiner werdenden Maschenweiten gesiebt und dokumentiert. Daraus wurde eine Spangrößenverteilung/-analyse ähnlich einer Sieblinie erstellt.

200 g der Wachsspäne wurden nacheinander durch kleiner werdende Siebe gesiebt. Nach jedem Siebgang wurde das gesiebte Material gewogen. In

Abbildung 4-7 ist die Spangrößenverteilung dargestellt. Dieser Versuch wurde dreimal wiederholt und zeigte jeweils ähnliche Ergebnisse.

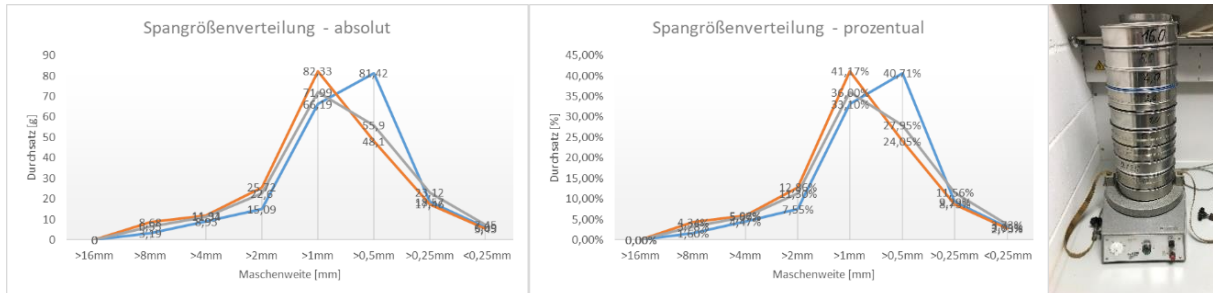


Abbildung 4-7: Spangrößenverteilung absolut; Spangrößenverteilung prozentual; Siebmaschine mit übereinander gestapelten, von oben nach unten kleiner werdenden Sieben (v. l. n. r.)

4.2.1.2 Volumenkontraktion beim Pressen von Zylindern

Zur Auslegung der Presse (maximale Presskraft) und der benötigten Pressform (Pressformhöhe) sind Kenntnisse über die Volumenkontraktion in Abhängigkeit von der Spangrößenzusammensetzung der zu pressenden Späne immanent wichtig. Aus diesem Grund wurden mit Hilfe der kleinformatigen Pressformen (Abbildung 4-3) Volumenkontraktionsuntersuchungen durchgeführt, in denen die Presskraft gesteigert und die Probenhöhe je Lastschritt dokumentiert wurde. In Abbildung 4-8 ist das Ergebnis dieser Versuchsreihe dargestellt. Ausgehend von den nach 4.2.1.1 durchgeführten Sieblinienuntersuchungen wurden mit dem gleichen Verfahren vier unterschiedliche Spangemische hergestellt. Das Ausgangsmaterial war bei allen vier gleich. Lediglich das Größtkorn unterschied sich. So wurde bei der *blauen Linie* (Abbildung 4-8) das gesamte Spangrößenspektrum für den Versuch herangezogen (ungesiebt), wohingegen bei der *gelben Linie* (Abbildung 4-8) nur Wachsspäne benutzt wurden, die das 0,5-mm-Sieb durchlaufen hatten. Die Menge betrug bei allen Versuchen jeweils 800 g.

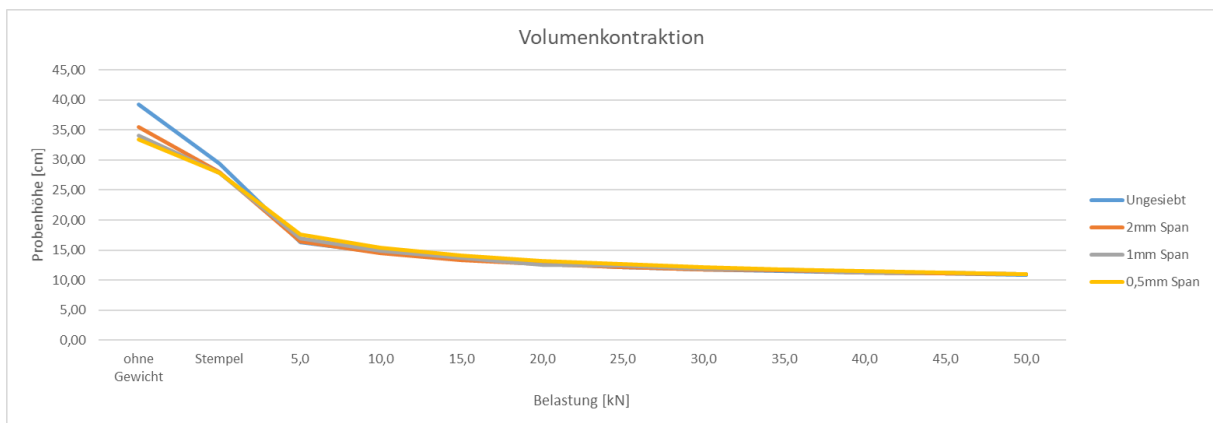


Abbildung 4-8: Darstellung der Volumenkontraktion von Wachsgrenulat bei 20 °C mit unterschiedlichem Größtkorn

Es wird deutlich, dass dessen Anfangsvolumen dichter ist, je kleiner das Größtkorn der jeweiligen Probe ist (Schüttdichte) (Abbildung 4-8 links *ohne Gewicht*). Die blaue Kurve besitzt bei gleichem Gewicht und gleicher Fläche eine größere Höhe als die anderen Spangemische. Nach Steigerung der Kraft auf 5,0 kN, nähern sich alle vier Kurven einander an. Wird die Presskraft auf 50,0 kN gesteigert, ist kein Unterschied zwischen den vier Linien zu erkennen. Durch die Endhöhe der zusammengepressten Wachspuben können mit Hilfe des Gewichts und deren Volumen Rückschlüsse auf die finale Dichte

der Proben nach dem Pressprozess gezogen werden. Alle vier Spangemische erreichen eine Dichte von $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$, was im Vergleich zum gegossenen CFW ($\rho = 950 \text{ kg/m}^3$) ~97 % entspricht. Da der Pressprozess bei Raumtemperatur Probenkörper aus gepresstem Wachsgranulat mit fast gleicher Dichte wie mit gegossenem Wachs liefert, kann davon ausgegangen werden, dass die Presskräfte, die in diesem Versuch festgelegt wurden, als zielführend für weiterführende Versuche zu betrachten sind.

Am Beispiel des Spangemischs mit einem Größtkorn von 2 mm wird deutlich, dass das Verhältnis zwischen Schüttdichte (Dichte vor dem Pressprozess) und Dichte nach dem Pressvorgang bei ca. 3,3 liegt. Somit muss die Pressformhöhe mind. 3,5-mal so hoch sein, wie die gewünschte Zielhöhe des gepressten Wachsrohlings. Abschließend kann festgehalten werden, dass sich alle untersuchten Spangemische zielführend zusammenpressen lassen und somit ausgehend von diesem Versuch keine Einschränkungen hinsichtlich der Spangrößenbegrenzung notwendig sind.

4.2.1.3 Pressen von Wachsspänen in zwei Schichten

Wird der Verdichtungsfaktor von 3,5 des CFW auf einen Herstellungsprozess im 1:1-Maßstab skaliert, so wird deutlich, dass Pressformen bei einer Zielhöhe eines gepressten Wachsrohlings von 1,0 m mindestens 3,5 m hoch sein müssen. Zudem muss die Presse einen ähnlich langen Stempel und somit Hub besitzen. Da solch ein großer Stempel mit gleichzeitig hoher Presskraft hohe Investitionskosten zur Folge hat, wird in diesem Abschnitt untersucht, wie die Zielhöhe durch zweimaliges Aufpressen von Wachs erreicht werden kann. Um ein mögliches mehrschichtiges Aufpressen von CFW zu untersuchen, wurden im Vorfeld kleinmaßstäbliche Versuche durchgeführt. Das Pressen von Wachsspänen in mehreren Schritten hat zwei voneinander abhängige Einflussgrößen. Um wenige Pressschritte durchführen zu müssen, ist es zielführend, im ersten Pressschritt möglichst viel Wachsspanvolumen zu komprimieren. Zum anderen sollen sich jedoch die Schichten zwischen zwei Pressschritten gut miteinander verbinden, was auf eine möglichst geringe Presskraft im ersten Pressschritt hinweist. Das Optimum zu finden, war ein Teilziel dieser Versuchsreihe. In Abbildung 4-8 wird deutlich, dass die Volumenkontraktion im Bereich zwischen *ohne Gewicht* und 5,0 kN am stärksten abfällt. Im Bereich zwischen 5,0 kN und 50,0 kN findet kaum noch eine Verringerung des Volumens beim Pressen statt. In dieser Versuchsreihe wurden vier verschiedene Presskräfte (1,5 kN, 2,5 kN, 3,5 kN, 5,0 kN) für den ersten Pressschritt (1. Vorverdichtung) untersucht. Dieser Versuch wurde mit jeweils 200 g Wachsspänen durchgeführt. Die maximale Einfüllhöhe wurde auf 7,5 cm begrenzt. Abbildung 4-9 zeigt den schematischen Aufbau und die Durchführung. Im ersten Pressschritt wurden 137 g von 200 g in die Pressform gefüllt. Nach dem ersten Pressschritt wurden die Restspäne (63 g) nachgefüllt und mit der Zielpresskraft von 35,0 kN bei 20 °C zusammengepresst.

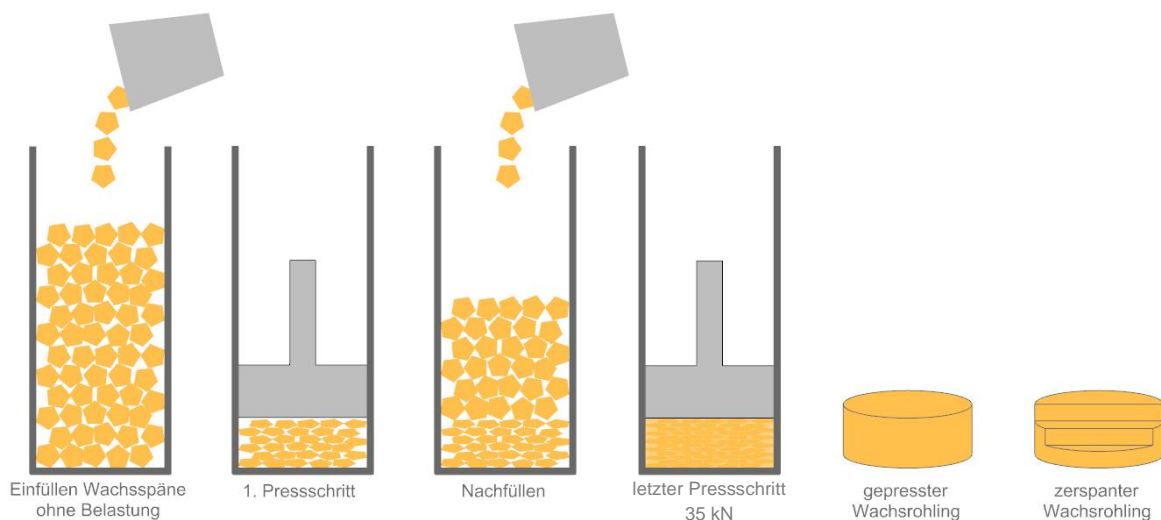


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung „Mehrschichtiges Aufpressen“

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen



Abbildung 4-10: Zerspanungsergebnis „Mehrschichtiges Aufpressen“ bei 20 °C

Im Anschluss an das mehrschichtige Aufpressen von Wachsspänen wurden die Wachsrohlinge *stufenweise* zerspannt (Abbildung 4-9 rechts), um eine mögliche Trennschicht zwischen den beiden Pressschritten sichtbar zu machen. In Abbildung 4-10 ist das Zerspanungsergebnis dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass bei keinem der vier mit unterschiedlichen Presskräften des ersten Pressschritts hergestellten Wachsrohlingen eine Trennschicht erkennbar ist. Alle Proben weisen ein homogenes Wachsspangefüge auf.

In Abbildung 4-11 ist das Ergebnis des Versuchs hinsichtlich der Volumenkontraktion dargestellt. Die Dichte nimmt mit steigender Presskraft im ersten Pressschritt zu.

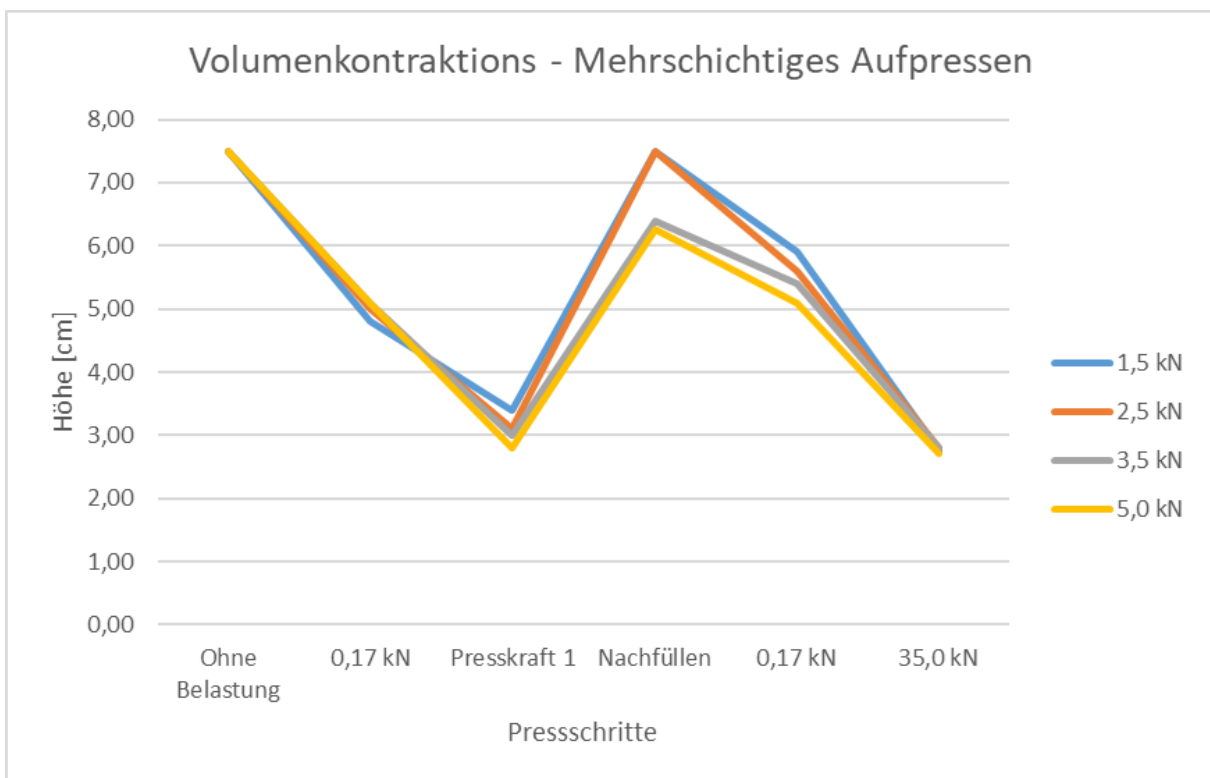


Abbildung 4-11: Einfluss der Presskraft im ersten Pressschritt auf die Volumenkontraktion

In Abbildung 4-11 wird deutlich, dass sich die Höhe des Wachsrohlings bei einer Steigerung der Presskraft im ersten Pressschritt stetig verringert. Die Höhe und somit die Dichte des Wachsrohlings bei 35 kN Presskraft sind bei allen vier Wachsrohlingen unverändert. Somit hat die Wahl der Presskraft im ersten Schritt keine Auswirkungen auf die Dichte des final gepressten Wachsrohlings. Ausgehend von diesen Ergebnissen kann festgehalten werden, dass es zielführend ist, bei der Herstellung von mehrschichtig aufgepressten Wachsrohlingen im ersten Pressschritt rund 10 % der maximalen Presskraft anzusetzen. Dieses Verhältnis wird auch beim Großpressversuch als Grundlage für die

Versuchsdurchführung gewählt, wenn aufgrund der Bauform der Presse und der Pressform nicht in einem Schritt gepresst werden kann. In dieser Versuchsreihe wurden lediglich zwei Pressschritte untersucht. Es ist jedoch davon auszugehen, dass unter Einhaltung einer Presskraft von 10 % der maximalen Presskraft bei den Vorverdichtungsschritten auch mehrere Vorverdichtungsschritte möglich sind.

4.2.1.4 Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper

Wie in 4.2.1.2 erwähnt, ist beim reinen Zusammenpressen von Wachs keine Begrenzung des Größtkorns notwendig. Es kann jedoch keine Aussage über das innere Gefüge der einzelnen Wachsspäne mit unterschiedlichem Größtkorn getroffen werden. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt die Wachsspäne mit unterschiedlichem Größtkorn (vgl. 4.2.1.1) einer Druckfestigkeitsuntersuchung unterzogen, um etwaige Fehlstellen oder eine Inhomogenität des Wachsgrenulats zu untersuchen. Die Herstellung der Wachsprobekörper erfolgt analog zu Abbildung 4-15. Es wurden jeweils zwei Probekörper des jeweiligen Spangemisches hergestellt.

Alle Druckfestigkeitsversuche wurden mit Hilfe einer 50-kN-Universal-Prüfmaschine des Instituts für angewandte Mechanik der TU Braunschweig durchgeführt. In Anlehnung an die Norm [100], die für Kunststoffe die Druckeigenschaften regelt, wird eine Prüfgeschwindigkeit von 2,5 mm/min festgelegt. Die Probengrößen, die laut Norm [100] vorgesehen sind (10/10/4 mm), sind im Kontext der hier verwendeten Pressformen zu klein und nicht als zielführend einzustufen. Aus diesem Grund wurden Probengrößen in Anlehnung an die EN 12390-1:2012 [101] mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von ca. 150 mm festgelegt.

Laut Norm [101] ist die Höhe der Probe das Zweifache des Durchmessers. Aufgrund des Verhältnisses der Schüttdichte zur final gepressten Dichte von 3,5 müsste die kleinformatische Pressform eine Höhe von rund 700 mm haben. Herstellungstechnisch wurde die kleinformatische Pressform lediglich mit einer Höhe von 520 mm hergestellt, was eine Reduzierung der Probenhöhe von 200 mm auf 150 mm zur Folge hatte. Im Betonbau weisen gedrungene Betonkörper wegen der Behinderung der auflagernahen Querdehnung bei Druckfestigkeitsuntersuchungen eine Steigerung der Festigkeit auf. Bei der Prüfung von Betonzylindern werden diese Abmessungen gewählt, damit der Bereich des Reibungsschlusses zwischen Probe und Prüfmaschine keinen Einfluss auf die Mitte der Probe nimmt und sich hier die Querdehnung ungestört ausbreiten kann. [102]

Aus diesem Grund ist die Einhaltung der Höhe als doppeltes Maß des Druckmessers des Zylinders notwendig, um die Querdehnung in der Probenmitte nicht zu behindern. Bezüglich des Werkstoffes Wachs ist im Vergleich zu Beton aufgrund geringerer Festigkeiten davon auszugehen, dass die auflagernahe Querdehnung kaum behindert wird. Zudem wird zwischen dem Wachsprobekörper und den Druckplatten der Prüfmaschine Backpapier als Trennschicht eingesetzt, um eine freie Verformung zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchung wurden gemittelt und sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Die Ergebnisse jedes einzelnen Druckfestigkeitsversuchs sind mit Bildern im Anhang dieser Arbeit zu finden.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

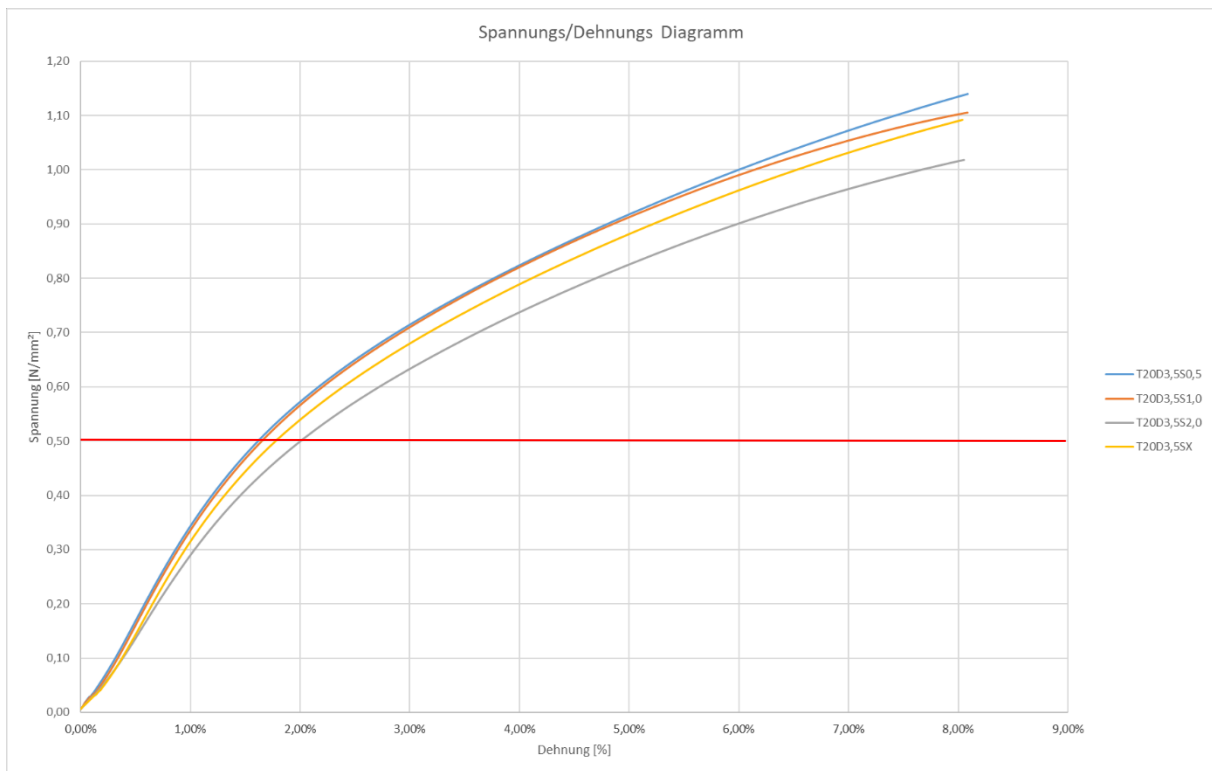


Abbildung 4-12: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Wachsspanen mit unterschiedlichem Größtkorn (gemittelt)

Folgende Dehnungen treten bei den einzelnen Prüfkörpern (Benchmark $\sigma_{hd} = 0,5 \frac{N}{mm^2}$) mit unterschiedlichem Größtkorn auf:

T20D3,5S0,5	= 1,59 %
T20D3,5S1,0	= 1,65 %
T20D3,5S2,0	= 2,00 %
T20D3,5SX	= 1,78 %

Bei diesem Versuch wird deutlich, dass die Prüfkörper der Wachsspäne mit einem Größtkorn von 2,0 mm die größte Dehnung im Vergleich zu den anderen Proben aufweisen. Somit besitzen die anderen Proben eine höhere Druckfestigkeit.

4.2.1.5 Zusammenfassung

Es lässt sich festhalten, dass durch die geringe Anzahl an Prüfkörpern noch keine qualitative Aussage über eine allgemein gültige Druckfestigkeitsverteilung getroffen werden kann. Zudem birgt keine Limitierung des Größtkorns in späteren Versuchen die Gefahr einer möglichen Inhomogenität. Durch wenige lokale großvolumige Späne im Wachsgewebe kann dies eine Schwachstelle im Gefüge darstellen und sich negativ auf die Druckfestigkeit auswirken. Obwohl dieser Effekt bei den zuvor beschriebenen Versuchen nicht sichtbar wurde, ist eine Begrenzung des Größtkorns für spätere Versuche als sinnvoll zu erachten, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Im Gegensatz dazu hat eine starke Limitierung des Größtkorns auf 1,0 mm oder 0,5 mm großen Ausschuss an Wachsspanmaterial (vgl.

Abbildung 4-7) zur Folge, was sich wiederum nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit auswirken würde. Aus den zuvor genannten Gründen wird das Größtkorn der zukünftig verwendeten Wachsspäne auf 2,0 mm begrenzt. Späne mit einer Größe >2 mm werden aussortiert, gesammelt und können später dem Recycling-Prozess zugeführt werden. In allen weiteren Versuchen werden ausschließlich Wachsspäne mit einer maximalen Größe von 2 mm eingesetzt.

4.2.2 Einfluss von Temperatur und Presskraft auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprükörper

Wie zuvor beschrieben, sind die zwei wesentlichen Einflussparameter bezüglich des Pressens von Wachs die Temperatur und die Presskraft. Ziel der Druckfestigkeitsuntersuchung ist es, eine detaillierte Aussage darüber zu treffen, bei welchen Presskräften und Herstelltemperaturen die Wachskörper die höchste Druckfestigkeit aufweisen, um im nächsten Schritt zielführend zerspannt werden zu können. Bei den Versuchen werden Wachsspäne unterschiedlich temperiert und mit variablen Presskräften mit Hilfe einer zylindrischen Pressform zusammengepresst. Herstellungsverfahren, bei denen pulverförmiges Material ohne Zusatz von Klebstoffen in eine großformatige Form gepresst wird, sind selten. Deshalb gibt es in diesem Bereich kaum Forschungsergebnisse, die als Grundlage für die durchzuführenden Versuche dienen könnten. Lediglich die Untersuchungen aus dem vorherigen Kapitel können als Annäherung herangezogen werden.

Ähnlich wie bei der Prüfung der Zylinderdruckfestigkeit von Beton werden die Wachszyylinder nach der Herstellung in einer Universal-Prüfmaschine auf deren Druckfestigkeit hin untersucht. Der Ablauf der Versuche wird mit folgender Grafik verdeutlicht:

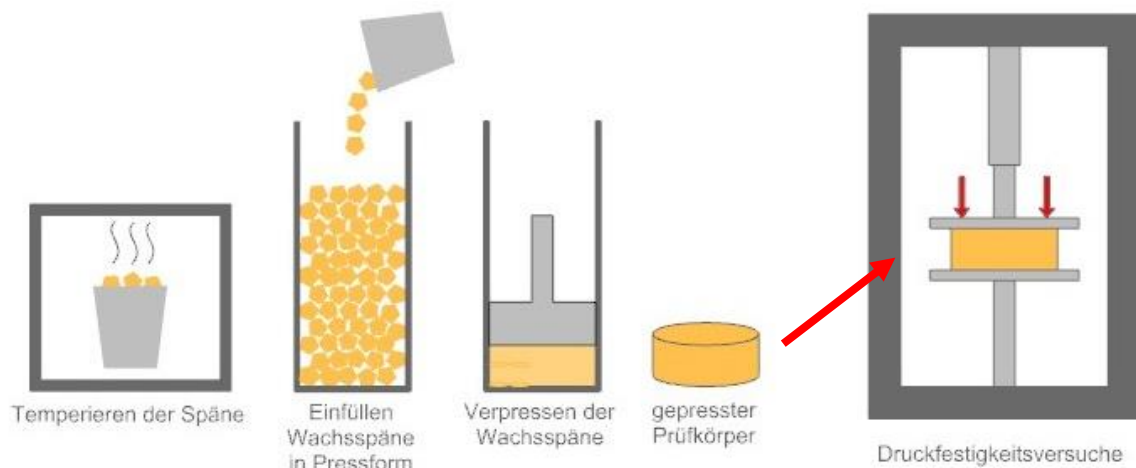


Abbildung 4-13: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Prüfkörper und der Druckfestigkeitsuntersuchung der Prüfkörper

Die Späne werden bei 20 °C Raumtemperatur gelagert. Sollen Wachsprükörper über oder unter 20 °C Herstelltemperatur produziert werden, werden diese vor dem Pressprozess temperiert. Zur Erwärmung der Wachsspäne zwischen 30 °C und 50 °C werden diese in einer Metallschale abgewogen und in einem Ofen erwärmt. Eine Erwärmung auf über 50 °C ist nicht zielführend, da das Wachs bei über 50 °C anfängt zu schmelzen und dadurch nicht mehr verarbeitbar ist. Um die Temperatur möglichst konstant zu halten, wird der Ofen mit einer digitalen Temperaturregelungseinheit mit Anzeige versehen, mit der er bis auf ± 2 °C genau temperiert werden kann. Die Späne, die bei 10 °C gepresst werden, werden zuvor in einem Kühlschrank temperaturgesteuert gekühlt.

Die Herstellung der Wachsrohlinge erfolgt mit einer hydraulischen Werkstattpresse. Dazu werden die Späne in die zylindrische Pressform gefüllt und mit einem passgenauen Stempel verpresst. Zum Messen der Druckkraft wird eine Kraftmessdose verwendet (Abbildung 4-15). Um



Abbildung 4-14: Verwendete Wachsspäne

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

den gepressten Wachsprüfkörper wieder aus der Form zu entnehmen, wird der Boden der Pressform demontiert und der Wachsprüfkörper mit Hilfe des Stempels nach unten herausgedrückt.



Abbildung 4-15: Pressform mit passgenauem Stempel; Werkstattpresse (1) mit Druckhebel (2), Pressform (3), Stempel (4) und Kraftmessdose (5) (v. l. n. r.)

Bei der Herstellung der Probekörper zwischen 30 °C und 50 °C wird bei der ersten Versuchsreihe die Pressform vor dem Verpressen mittels Heizkabel ebenfalls temperiert. Allerdings kann die Temperatur nicht gradgenau eingestellt werden und nur mit einem Lasermessgerät lokal kontrolliert werden, sodass Abweichungen nicht ausgeschlossen werden können. Zudem kommt es beim Temperieren zu Verklebungen im Inneren der Form, was die Produktion der Wachsprüfkörper behindert. Aus diesem Grund wird ab der zweiten Versuchsreihe die Pressform nicht weiter beheizt.

4.2.2.1 Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10 °C-50 °C, Presskraftbereich 10 kN-50 kN

Bei Voruntersuchungen am ITE der TU Braunschweig wurde bereits herausgefunden, dass sich die Wachsspäne besser zusammenpressen lassen, je höher die Temperatur und der Druck bei der Herstellung sind. Erhöhte Herstelltemperaturen sind allerdings gleichzeitig mit höheren Produktionskosten verbunden. Um den Einfluss der Temperatur sowie der Presskraft bei der Herstellung von Wachsprüfkörpern auf deren Druckfestigkeiten hin zu untersuchen, wird eine Versuchsmatrix aufgestellt.

Auf der Grundlage dieser Versuchsmatrix sollen weiterführende Versuche aufbauen, damit das Herstellungsverfahren sowohl die technischen als auch wirtschaftlichen Anforderungen erfüllt. Insgesamt wurden in der ersten Versuchsreihe 40 Probekörper hergestellt. Die Temperatur variierte dabei von 10 °C bis 50 °C in 10-°C-Schritten. Beim Herstellen des ersten Probekörpers bei 50 °C zeigte sich, dass sich die Wachsspäne bei diesen Temperaturen im Ofen vollständig verklebten, sodass die Weiterverarbeitung kaum möglich war und das Wachs nicht in die Pressform gefüllt werden konnte. Deshalb wurden die Versuche bei Herstelltemperaturen von 50 °C nicht weitergeführt. Vorversuche haben gezeigt, dass eine Presskraft von rund 35 kN bei 20 °C zielführend ist (Abbildung 4-12). Um einen möglichst großen Bereich zu untersuchen, wurden Presskräfte von 10 kN bis 50 kN vorgesehen,

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

die in Schritte von 10 kN in der ersten Versuchsreihe unterteilt waren. Da die Pressform einen Durchmesser von 10 cm hat, ergibt sich somit ein Druckspannungsbereich von 1,27 bis 6,37 N/mm². In jeder Kombination wurden aus zeitlichen Gründen aufgrund des engen Projektablaufplans zwei Probekörper hergestellt.

Nachfolgend werden zur besseren Übersicht die Versuchsmatrix und die möglichen Kombinationen mit der Probenanzahl dargestellt:

Tabelle 4-1: Übersicht über die gepressten Probekörper aus Versuchsreihe I

1. Versuchsreihe				
Presskraft	Temperatur			
	10°C	20°C	30°C	40°C
10 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben
20 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben
30 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben
40 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben
50 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben

Erkenntnisse aus der Herstellung

Anhand der schon durchgeführten Versuche hinsichtlich der Volumenkontraktion (vgl. 4.2.1.2) kann die Rohdichte des gepressten Wachsmaterials bestimmt werden. Anhand dieser Berechnung kann für zukünftige Versuche die Menge an Wachsmaterial bestimmt werden, um die gewünschte Zielhöhe des gepressten Wachsprüfkörpers zu erhalten. Gleiche Versuche hinsichtlich der Volumenkontraktion bei erhöhten und niedrigeren Herstelltemperaturen wurden in Vorversuchen analog zu den Versuchen in 4.2.1.2 bestimmt.

Tabelle 4-2: Steigerung der Rohdichte in Abhängigkeit von Temperatur und Druckkraft

Presskraft	Rohdichte 10°C	Rohdichte 40°C	Steigerung
[kN]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
10	0,5667	0,7998	41,13%
20	0,6506	0,8875	36,41%
30	0,6968	0,9378	34,57%
40	0,7372	0,9488	28,71%
50	0,7738	0,9550	23,42%

Nach dem Pressen wurden alle Wachskörper vermessen und gewogen. Es stellte sich heraus, dass die Rohdichte in Abhängigkeit von der Temperatur der Wachsspäne variiert. Wie Tabelle 4-2 zeigt, sind bei einer Erhöhung der Temperatur von 10 °C auf 40 °C Steigerungen der Rohdichte von mehr als 40 % möglich. Im höchsten Druck- und Temperaturbereich wurden sogar Rohdichten von 0,95 g/cm³ erreicht, was der Rohdichte des Wachses im gegossenen Zustand entspricht. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Probekörper hohe Festigkeitswerte aufweisen könnten.

Des Weiteren dehnen sich die fertigen Zylinder nach dem Entlasten der Presse in der Höhe wieder aus. Hierbei fällt auf, dass die Ausdehnung mit höherer Temperatur und zunehmendem Druck kleiner wird. Daraus kann somit geschlossen werden, dass sich die Späne bei höheren Temperaturen und

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Presskräften besser miteinander verbinden. Die Ausdehnung nach der Entlastung in Abhängigkeit von Temperatur und Druckkraft kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

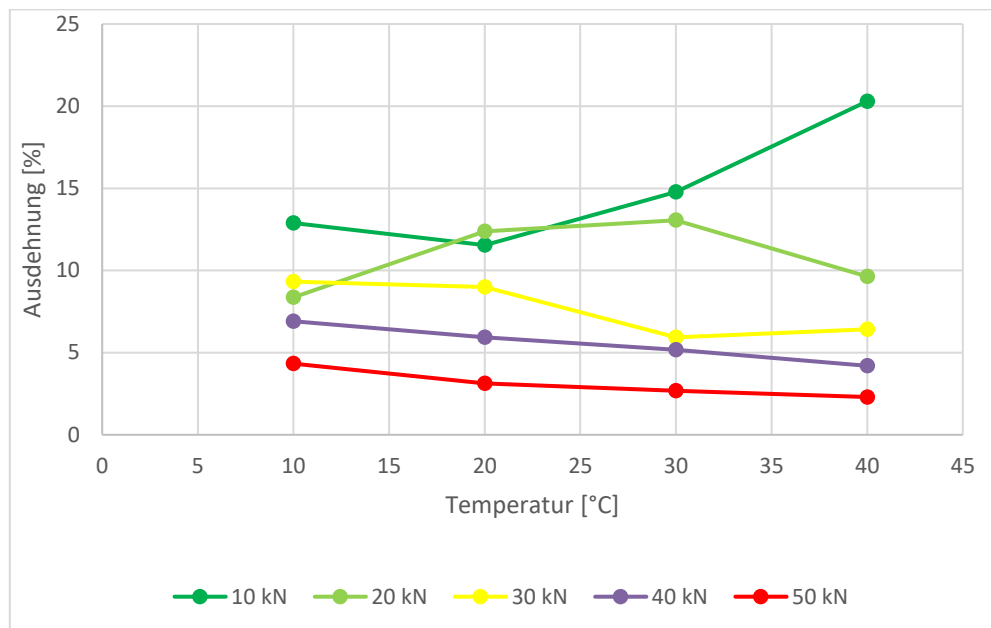


Abbildung 4-16: Ausdehnung der Probekörper nach der Herstellung in Abhängigkeit von Druckkraft und Temperatur

Auffällig sind die abweichenden Ergebnisse bei Druckkräften von 10 kN und 20 kN. Diese sind auf Ungenauigkeiten bei der Messung und auf einen allgemein schlechteren Verbund der Wachsspäne bei niedrigem Druck zurückzuführen. Da davon ausgegangen wird, dass niedrige Druckkräfte nicht zielführend sind, werden diese Ergebnisse nicht weiter betrachtet. Bei Temperaturen von 40 °C beträgt die Ausdehnung noch einige Prozent. Dies bildet einen Gegensatz zu den gegossenen Probekörpern bei früheren Versuchen, die sich beim Abkühlen zusammengezogen haben, wodurch sich Risse im Inneren bildeten. [103]

Die Prüfkörper, die mit niedrigen Presskräften hergestellt wurden, besitzen teilweise spröde Oberflächen, sodass sich bereits beim Berühren Wachsspäne lösen. Beim Herausdrücken der Prüfkörper aus der Pressform kam es zu Abplatzungen an den Kanten. Ab einer Presskraft von 30 kN tritt dieses Phänomen nicht mehr auf.

Für die späteren Druckversuche war es notwendig, eine möglichst einheitliche Höhe der Probekörper zu erhalten. Deshalb musste die verwendete Menge an Wachsspänen stetig angepasst werden. Trotz der Anpassung der Wachsmengen konnte eine Prüfkörperhöhe von 15 cm nicht dauerhaft exakt eingehalten werden. Die Höhe unterschied sich teilweise um $\pm 1,5$ cm. Dies ist für die Druckfestigkeitsversuche vernachlässigbar.

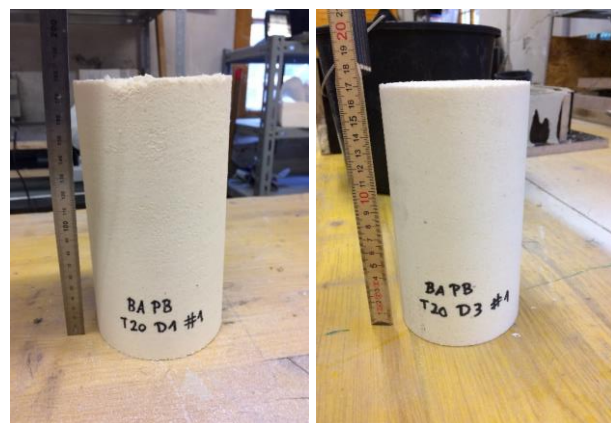


Abbildung 4-17: Probekörper mit spröder Oberfläche und Abplatzungen an der Kante; Probekörper mit glatter Oberfläche ohne Abplatzungen (v. l. n. r.)

Druckfestigkeitsprüfung

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte ausschließlich bei Raumtemperatur (20 °C) mithilfe einer Tisch-Prüfmaschine des Modells Z050 der Firma Zwick/Roell. Die Maschine fährt im ersten Schritt eigenständig eine Vorlast von 50 N auf. Im Anschluss daran beginnt die eigentliche Druckfestigkeitsprüfung der einzelnen Proben. Laut DIN EN ISO 604 [104] soll für die Festigkeitsprüfung

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

von Kunststoffen die Vorlast kleiner als das 0,01-Fache der maximalen Druckfestigkeit sein. Allerdings kann an dieser Stelle nicht exakt vorhergesagt werden, welche Druckfestigkeit die schlechtesten Proben aufweisen, weshalb der gewählte Wert als Näherung zu betrachten ist. Anschließend beginnt die Maschine mit der Druckfestigkeitsprüfung mit einer weggesteuerten Belastung von 2,5 mm/min. Die im Folgenden gemachten Angaben zu Temperatur und Presskraft beziehen sich auf den Zeitpunkt der Herstellung und nicht auf den der Prüfung.

Ergebnisse

Das nachfolgende Diagramm gibt einen ersten Überblick über die erreichten Druckfestigkeiten. In den unteren Druck- und Temperaturbereichen sind bereits Abweichungen zwischen zwei gleich hergestellten Proben zu sehen. Mit steigender Temperatur werden diese Abweichungen immer größer. Deshalb und weil die Anzahl von nur zwei Probekörpern je Temperatur und Druckkraft gering ist, wird in der ersten Versuchsreihe auf das Erstellen eines Durchschnittswertes verzichtet. Die Werte beider Proben werden nebeneinander dargestellt. Die jeweiligen Festigkeitswerte und Spannungs-Dehnungs-Linien aller Proben können dem Anhang entnommen werden.



Abbildung 4-18: Probekörper in Druckprüfmaschine - Probekörper vor der Prüfung; zerstörter Probekörper (v. l. n. r.)

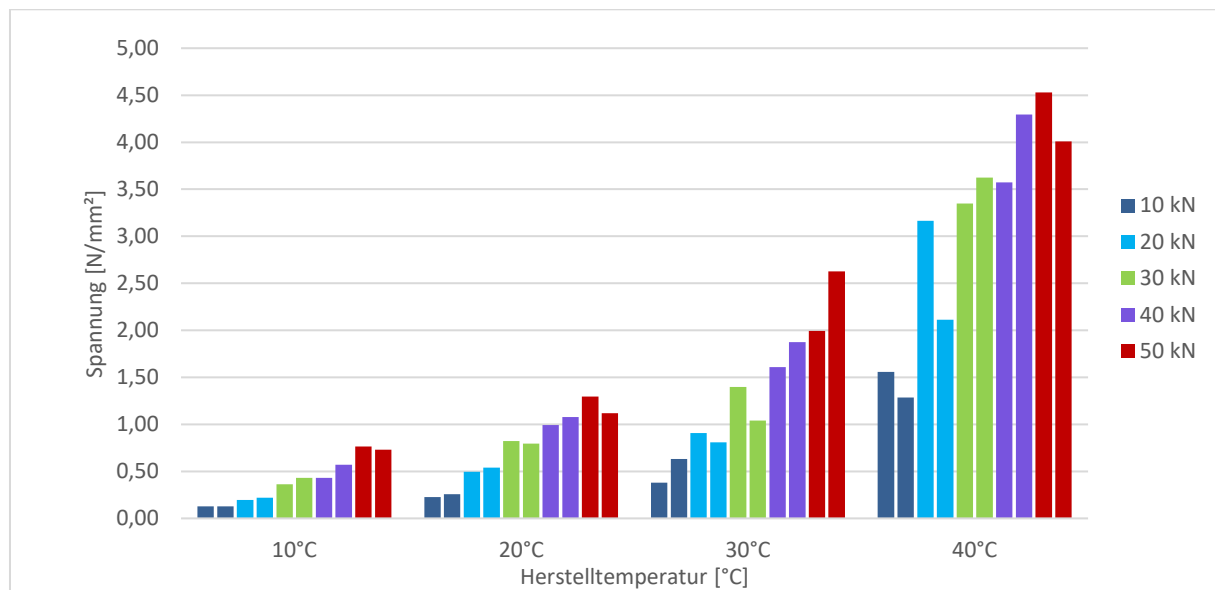


Abbildung 4-19: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von Herstellungsdruck- und Temperatur

Der abgebildeten Grafik kann entnommen werden, dass mit steigender Druckkraft und Temperatur bei der Wachsprüfkörperherstellung die maximal aufnehmbare Druckkraft ansteigt. Bei den Proben, die mit einer Presskraft von 50 kN hergestellt wurden, führt die Erhöhung der Temperatur von 10 °C auf 40 °C zu einer Steigerung der Festigkeit um mehr als 470 % (Abbildung 4-20 rechts). Bei den Proben, die bei 40 °C hergestellt wurden, führt eine Erhöhung der Presskraft von 10 kN auf 50 kN zu einer Steigerung der Festigkeit um ca. 200 % (Abbildung 4-20 rechts). Es ist davon auszugehen, dass die Temperaturerhöhung einen größeren Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung hat als die Presskrafterhöhung. Die höchste Festigkeit wird bei 40 °C und 50 kN erreicht. Diese Wachskörper können eine Druckspannung von mehr als 4,0 N/mm² bei gleichzeitiger Dehnung von 8 % aufnehmen.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Die Dehnungen dieser Prüfkörper liegen bei einer Belastung durch den Benchmark der maximalen Druckfestigkeit von $\sigma_{hd} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ (vgl. 3.5) bei unter einem Prozent.

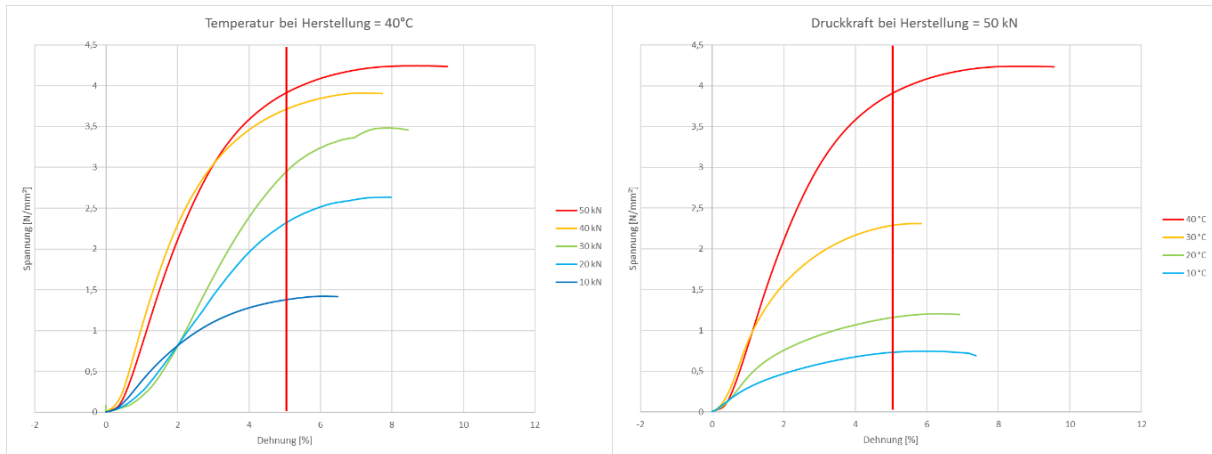


Abbildung 4-20: Darstellung der gemittelten Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Presskräften und bei konstanter 40°C Herstelltemperatur; Darstellung der gemittelten Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Herstelltemperaturen und bei konstanter 50 kN Presskraft (v. l. n. r.)

In Abbildung 4-20 links sind bei einer konstanten Wachspsantemperatur von 40 °C die resultierenden Druckfestigkeiten der Wachsrohlinge (bei 20 °C geprüft) bei steigender maximaler Presskraft aufgeführt. Hier wird deutlich, dass bei einer Steigerung der Presskraft die Zunahme der Druckfestigkeit geringer wird. Im Gegensatz dazu steigt bei konstanter maximaler Presskraft von 50 kN die Druckfestigkeit bei einer Erhöhung der Spantemperatur stetig weiter an (Abbildung 4-20 rechts). Das Maximum der Druckfestigkeit liegt bei 40 °C und 50 kN Presskraft und beträgt bei 5 % Dehnung $\sigma=3,90 \text{ N/mm}^2$. Dieses Maximum muss jedoch nicht das Optimum für den zu erforschenden automatisierten Prozess sein. Ggfls. reichen geringere Druckfestigkeiten für die Herstellung von großen Wachsrohlingen aus, da die Belastung der Wachsschalung durch den Betondruck unter der maximalen Druckfestigkeit der Wachsrohlinge liegt.

Weitere Darstellungen der Ergebnisse sowohl nach einer Steigerung der Temperatur als auch der Presskraft folgen. Abbildung 4-21 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Linien von zehn Prüfkörpern, die bei 30 °C hergestellt wurden. Bei den Proben von 40 kN und 50 kN geht der Verlauf spätestens ab einer Dehnung von 0,5 % in eine linear-elastische Verformung über, bevor er schlussendlich in ein plastisches Fließen übergeht.

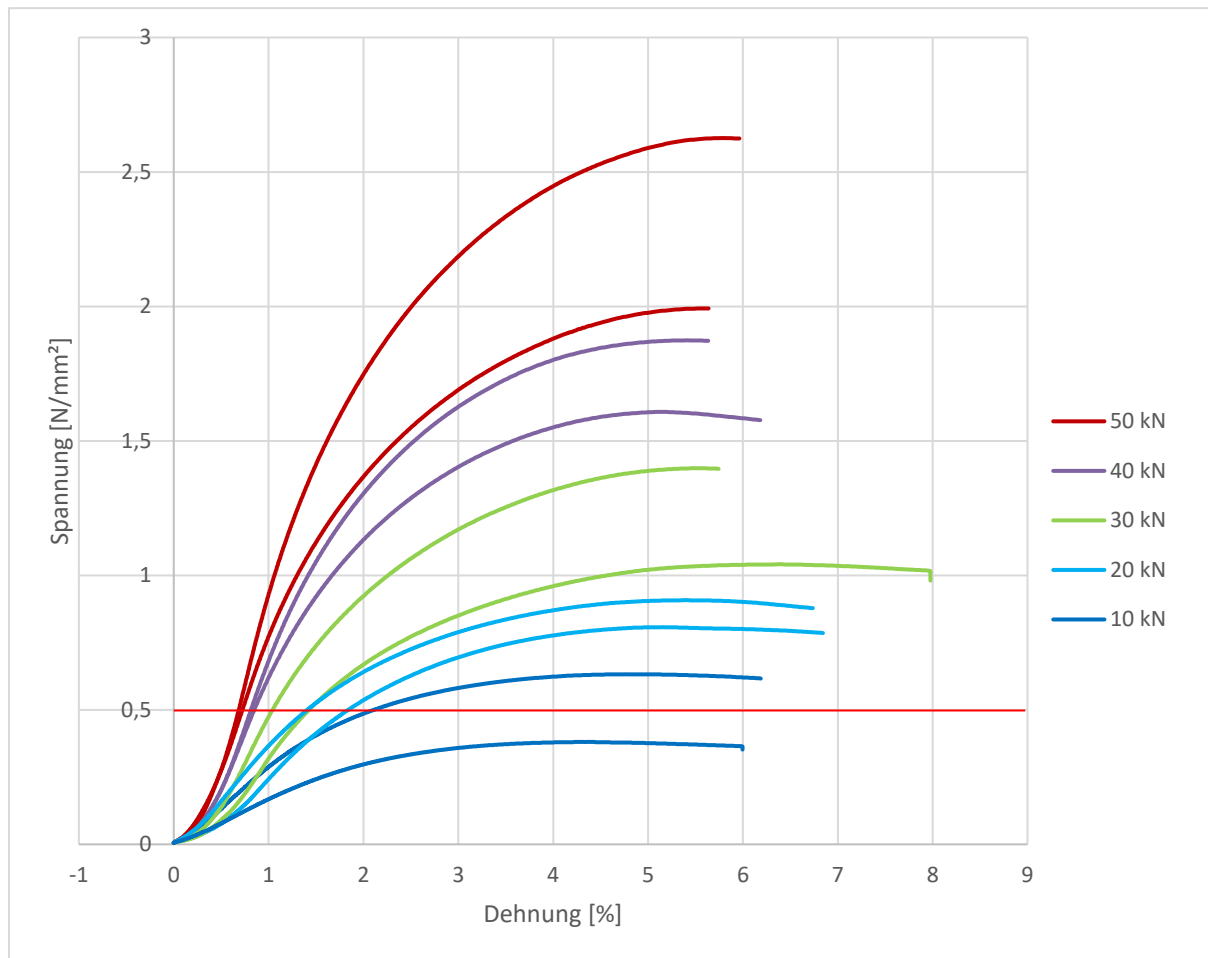


Abbildung 4-21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei konstanter Herstelltemperatur von 30 °C und unterschiedlichen Presskräften

Zudem werden die teilweise starken Abweichungen zwischen zwei unter identischen Bedingungen hergestellten Prüfkörpern sichtbar. Diese resultieren wahrscheinlich aus Ungenauigkeiten während des Herstellungsprozesses, da die Presse händisch mit einem Hebel bedient werden musste. Die Steigerung der Druckkraft ist abhängig von der Geschwindigkeit, mit der der Hebel betätigt wird.

In einem vollautomatisierten Pressprozess können die Presskräfte über den gesamten Zeitraum konstant oder linear gesteigert werden, wodurch die erreichten Festigkeiten der Wachsprüfkörper enger beieinander liegen werden. Denkbar ist ebenfalls, die Druckkraft langsam zu steigern, damit die losen Wachsspäne genug Zeit haben, sich miteinander zu verbinden und in Freiräume zu *rutschen*. Langsames Pressen von Spänen hat zudem den Vorteil, dass eventuelle Lufteinschlüsse nicht schlagartig komprimiert werden, sondern genug Zeit haben, aus den Wachsspänen zu entweichen und so später das Wachsggefüge nicht stören.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

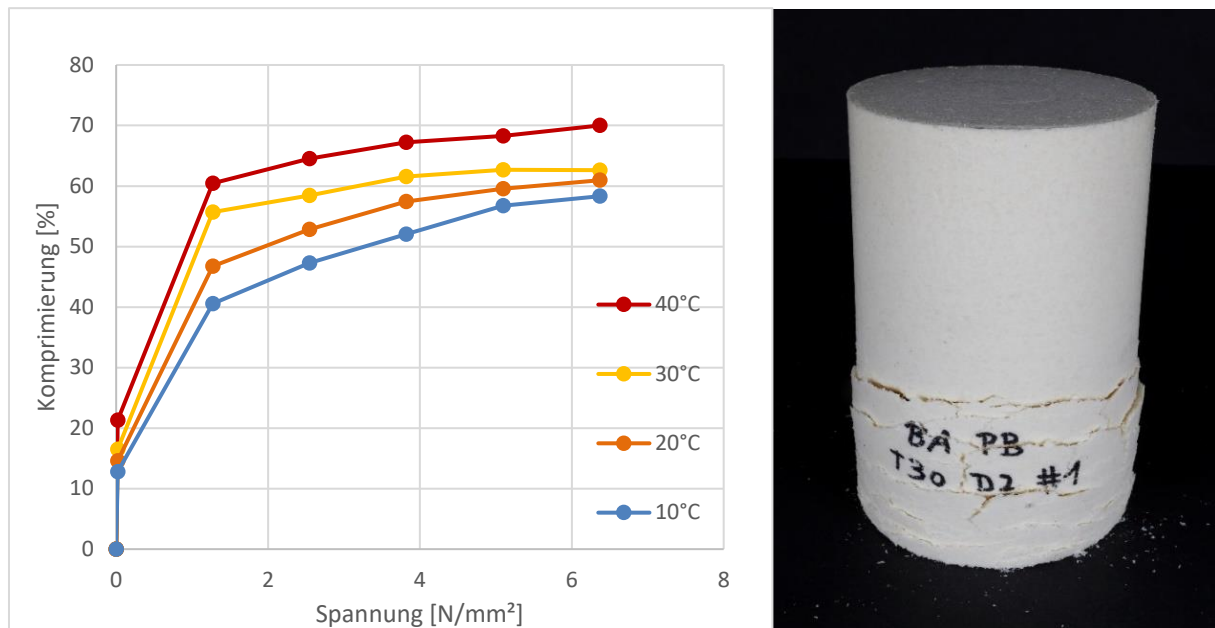


Abbildung 4-22: Volumenkontraktion bei der Herstellung in Abhängigkeit von der Druckkraft und der Herstelltemperatur; Rissbildung im unteren Bereich bei der Probe T30D2#1 (v. l. n. r.)

Die zuvor durchgeführten Versuche konnten jedoch nicht zeigen, ob die Druckfestigkeit weiter ansteigt, wenn die Presskraft über den Bereich von 50 kN gesteigert wird. Der Einfluss von hohen Presskräften wird in späteren Versuchen untersucht. Anhand der Volumenkontraktion, ähnlich den Versuchen in 4.2.1.2, wird deutlich, dass mit zunehmender Presskraft die Volumenkontraktion abnimmt (siehe Abbildung 4-22 links). Das legt die Vermutung nahe, dass die Wachskörper bei Lasten über 50 kN nicht viel weiter komprimiert werden können und somit keine wesentliche Verbesserung der Druckfestigkeit zu erwarten ist. Zudem wird bei 50 kN die Rohdichte des Wachses im gegossenen Zustand erreicht.

Gegen diese Annahme spricht, dass speziell die Probekörper, die zwischen 10 °C und 30 °C hergestellt wurden, im unteren Bereich die meisten Risse aufweisen und im oberen Bereich teilweise intakt sind (siehe Abbildung 4-22 rechts). Dies resultiert hauptsächlich aus unterschiedlichen Verdichtungsgraden über die Höhe des Probekörpers. Da ausschließlich eine einseitige Verdichtung von oben möglich war, wird vermutet, dass das oberliegende Pulver beim Verpressen einen größeren Weg zurücklegt und somit stärker verdichtet wird als im unteren Bereich (vgl. 3.2.2). Im unteren Bereich der Pressform geht Energie durch Wandreibung verloren, sodass der Körper im oberen Bereich eine höhere Verdichtung und somit eine bessere Druckfestigkeit aufweist. [59, 105]

Dies spricht dafür, dass vor allem im unteren Bereich weitere Verdichtung möglich ist, indem zum Beispiel die Druckkraft erhöht und damit dort die nötige Energie für einen guten Haftverbund erreicht wird. Denkbar ist auch, eine zweiseitige Presse zu verwenden, ähnlich der Tablettenherstellung (Abbildung 3-7). In diesem Fall würde sich der Druckabfall durch die Reibung auf beide Seiten verteilen und wäre nur halb so groß. Die Verdichtung wäre gleichmäßiger verteilt und die Festigkeit würde zunehmen. Bei der Herstellung von großformatigen Elementen im realen Maßstab in Zylinder- oder Rechteckform für die Verwendung im Schalungsbau ist dies unter Umständen nicht notwendig, da für diese Anwendung Elemente mit geringeren Presshöhen benötigt und mit einem geringeren Verhältnis von Presshöhe zu Grundfläche hergestellt werden. Somit wird die Abnahme der Verdichtung in Pressrichtung bei einseitigem Verpressen kleiner. [106]

4.2.2.2 Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35 °C-45 °C, Presskraftbereich 35 kN-55 kN

Die erste Versuchsreihe hat gezeigt, dass eine deutliche Verbesserung der Druckfestigkeit mit steigendem Druck und steigender Temperatur zu sehen ist. Da die größte Druckfestigkeit bei Wachsprüfkörpern gemessen werden konnte, die bei 40 °C und 50 kN hergestellt wurden, ist es sinnvoll, in der zweiten Versuchsreihe um diesen Bereich herum eine detailliertere Untersuchung durchzuführen. Dazu werden bei Temperaturen von 35 °C, 40 °C und 45 °C jeweils drei Probekörper mit Druckkräften von 45 kN, 50 kN und 55 kN hergestellt. Um die Ergebnisse der ersten und zweiten Versuchsreihe untereinander vergleichen zu können, werden die Abmessungen der Proben beibehalten. Die folgende Tabelle verdeutlicht den Umfang der zweiten Versuchsreihe.

Tabelle 4-3: Versuchsmatrix der 2. Versuchsreihe, abgeleitet von den Ergebnissen der 1. Versuchsreihe

1. Versuchsreihe					2. Versuchsreihe			
Presskraft	Temperatur				Presskraft	Temperatur		
	10°C	20°C	30°C	40°C		35°C	40°C	45°C
10 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben	45 kN	3 Proben	3 Proben	3 Proben
20 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben	50 kN	3 Proben	3 Proben	3 Proben
30 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben	55 kN	3 Proben	3 Proben	3 Proben
40 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben				
50 kN	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben				

Erkenntnisse aus der Herstellung

Anhand der Erkenntnisse aus der Herstellung der 40 Prüfkörper in der ersten Versuchsreihe können in der zweiten Versuchsreihe genauere Wachsmengen bestimmt werden, um Prüfkörper mit einer Zielhöhe von 15 cm herzustellen. Die Höhen der Wachsprüfkörper lagen zwischen 14,8 cm und 15,6 cm, was unter Berücksichtigung des manuellen Pressprozesses ein zufriedenstellendes Ergebnis bedeutete.

Beim Erhitzen des Waxes auf 45 °C verklebte dieses vereinzelt, was die Verarbeitbarkeit erschwerte. Zudem beulte sich die Unterseite des fertigen Wackskörpers nach dem Entnehmen aus der Form aus und es entstanden leichte Risse. Dieses Phänomen ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Volumenausdehnung des Waxes beim Erhitzen nicht linear verläuft (Abbildung 5-26). Bis 40 °C ist die Volumendehnung des Waxes moderat. Sie steigt jedoch ab einer Temperatur von 42 °C schlagartig an. Wird die Presskraft nach dem Pressprozess zurückgefahren, wird der hergestellte Wachsprüfkörper entlastet. Ohne diese Auflast dehnt sich im Kern das noch über 42 °C warme Wack schlagartig aus, wodurch Ausbeulungen und Risse am Prüfkörper sichtbar werden (Abbildung 4-23 links). Die Wachsspäne am Rand des Prüfkörpers, die in Kontakt mit der Pressform, dem Pressboden und dem Stempel aus 20 °C kaltem Stahl kommen, kühlen abrupt auf 20 °C ab, was zu dieser ungleichmäßigen Verformung durch eine innere Temperaturdifferenz führt.

Um die Wackkörper prüfen zu können, wurden die Unterseiten planparallel abgesägt. Im abgesägten Bereich war zu erkennen, dass die Wachsspäne am Rand einen schlechteren Verbund aufwiesen, da in diesem Bereich die Wacktemperatur der Späne durch den Kontakt mit der Pressform aus Stahl schnell sank (Abbildung 4-23 rechts).

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

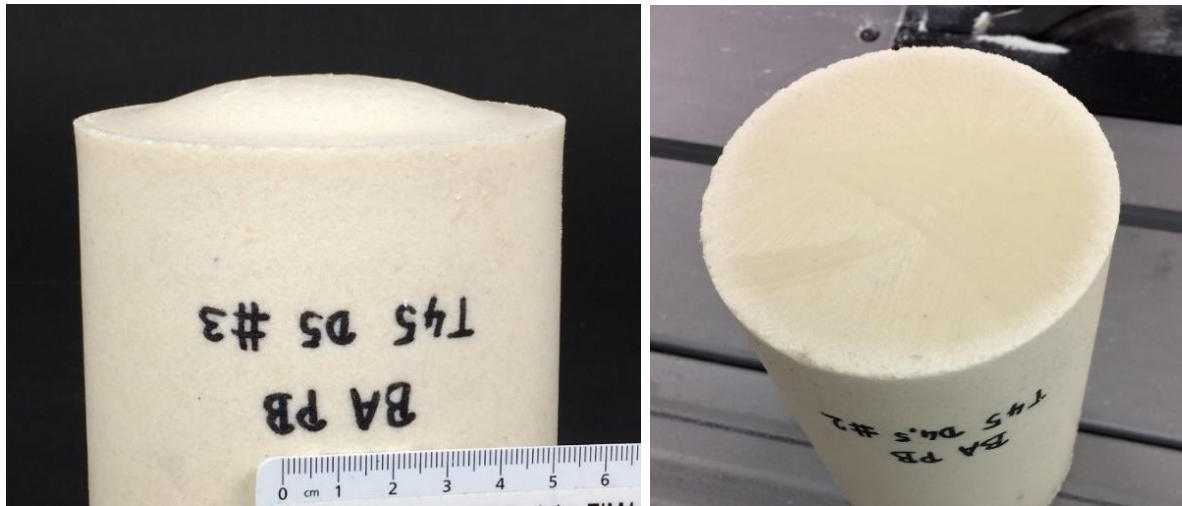


Abbildung 4-23: Ausbeulung und Rissbildung an der Unterseite des Prüfkörpers; abgesägte Unterseite ohne Risse (v. l. n. r.)

Abgesehen von den Unterseiten der Proben bei 45 °C treten bei keinen Wachskörpern Risse an der Oberfläche auf. Da die Abkühltemperatur an der Oberfläche generell am größten ist und somit dort am wahrscheinlichsten Risse auftreten, wird davon ausgegangen, dass im Inneren keine nennenswerten Inhomogenitäten in Form von Rissen auftreten. Sollte dies doch der Fall sein, werden diese Fehlstellen bei den späteren Fräsversuchen sichtbar.

Druckfestigkeitsprüfung

Um die erste und die zweite Versuchsreihe untereinander zu vergleichen, erfolgt die Druckfestigkeitsprüfung unter den gleichen Bedingungen. Die maximale Kontraktion wird zusätzlich auf 30 mm beschränkt und die Druckfestigkeitsprüfung wird automatisch von der Maschine unterbrochen, sobald diese erreicht ist, was bei einer Probenhöhe von durchschnittlich 150 mm einer Dehnung von 20 % entspricht. Allerdings ist im Hochbau eine solche Verformung der Betonschalung nicht akzeptabel.

Ergebnisse

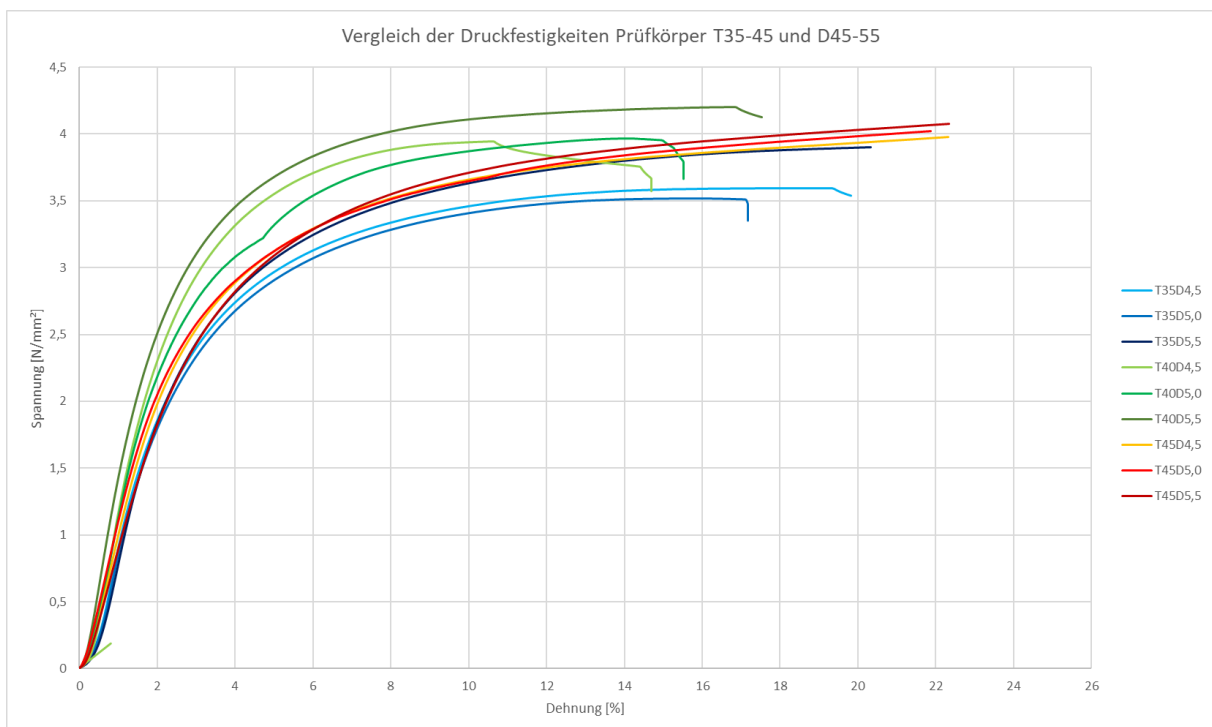


Abbildung 4-24: Darstellung der gemittelten Druckfestigkeitsentwicklung der gepressten Wachsprüfkörper T35-55 und D45-55

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Da in der zweiten Versuchsreihe die Temperatur- und Druckunterschiede bei der Herstellung geringer waren, bewegen sich die erreichten Druckfestigkeiten in einem kleineren Rahmen. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 4-24 bildet jeweils den Durchschnitt der drei getesteten Proben ab. Die Proben bei 40 °C und 55 kN weisen im Durchschnitt die beste Festigkeit auf, auch wenn die beste Einzeldruckfestigkeit bei der zweiten Probe bei 40 °C und 50 kN erreicht wurde. Im gleichen Bereich wurde bei der ersten Probe allerdings auch die schlechteste Druckfestigkeit erzielt. Warum die Streuung in diesem Bereich (T40D5) so groß ist, kann nicht gesagt werden. Wahrscheinlich ist dies auf Ungenauigkeiten bei der Herstellung zurückzuführen. Auffällig ist, dass bis zu einer Verformung von 15 mm die Druckfestigkeit bei 40 °C am höchsten ist und eine weitere Steigerung der Temperatur auf 45 °C zu einer Abnahme der Festigkeit führt. Dies ist möglicherweise auf die vorher erwähnten Ausbeulungen der Probekörper zurückzuführen.

Zu beachten ist außerdem, dass die Proben bei 45 °C nicht ihre höchste Druckfestigkeit erreichen konnten, da die maximale Dehnung von 30 mm überschritten und der Versuch von der Prüfmaschine abgebrochen wurde. Das ist wahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass das Wachs über 42 °C erwärmt wurde und somit fast zähflüssig war. Gepresste Wachsprüfkörper unterhalb der Temperatur von 42 °C sind als spröde zu betrachten, wohingegen die Prüfkörper, die bei über 42 °C hergestellt wurden, als elastisch einzustufen sind. Diese gesteigerte Elastizität lässt große Verformungen zu, was sich in den Ergebnissen widerspiegelt.

Bei Betrachtung der Proben, die mit 55 kN gepresst wurden, fällt auf, dass die Rissbildung sich nicht auf den unteren Bereich des Körpers begrenzt, wie es bei der Versuchsreihe mit niedrigeren Temperaturen und Druckkräften der Fall war. Das spricht dafür, dass mit einer Steigerung der Herstellungsdruckkraft und -temperatur die Verdichtung gleichmäßiger verteilt ist und somit auch der untere Bereich beim Pressprozess gut verdichtet wurde. Dieser Unterschied wird im Vergleich der Abbildung 4-22 (rechts) mit der Abbildung 4-25 (rechts) deutlich.

Druckfestigkeiten in [N/mm ²]			
Prüfkörper	Herstelltemperatur		
	35°C	40°C	45°C
45kN #1	3,55	3,70	3,93
45kN #2	3,72	4,15	4,00
45kN #3	3,52	4,14	4,01
Mittelwert	3,60	4,00	3,98
50kN #1	3,57	3,53	3,96
50kN #2	3,65	4,40	4,05
50kN #3	3,36	3,98	4,05
Mittelwert	3,53	3,97	4,02
55kN #1	3,74	4,17	4,06
55kN #2	3,96	4,19	4,05
55kN #3	4,00	4,26	4,13
Mittelwert	3,90	4,21	4,08

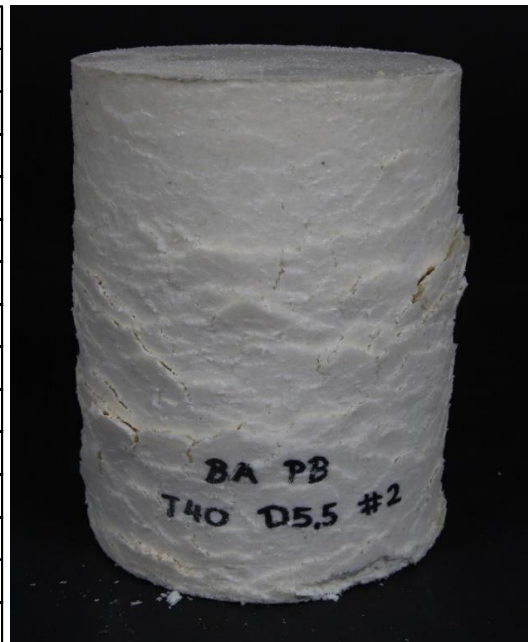


Abbildung 4-25: Darstellung der Ergebnisse der maximal erreichten Druckfestigkeiten der Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe; Rissbildung über die komplette Prüfkörperhöhe am Beispiel des Prüfkörpers T40D5,5 #2 (v. l. n. r.)

Bei Betrachtung der Spannungs-Dehnungs-Linien fällt auf, dass bei einer Steigerung der Druckkraft von 50 kN auf 55 kN die Verbesserung der Druckfestigkeit größer ausfällt als bei einer Steigerung der Druckkraft von 45 kN auf 50 kN. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Steigerung von 50 kN auf 55 kN ausreicht, um den schwächeren unteren Teil des Probekörpers ausreichend zu verdichten.

4.2.2.3 Versuchsreihe 3: Steigerung der Presskraft auf 100 kN

In der dritten Versuchsreihe wurde die Druckfestigkeit von Prüfkörpern untersucht, die bei hohen Presskräften und einer Herstelltemperatur von 40 °C hergestellt wurden. In dieser Versuchsreihe wurden zwei Prüfkörper untersucht. In Abbildung 4-26 werden die Druckfestigkeiten der Wachsprüfkörper, die mit einer Presskraft von 100 kN hergestellt wurden, mit den Prüfkörpern verglichen, die bei 55 kN hergestellt wurden.

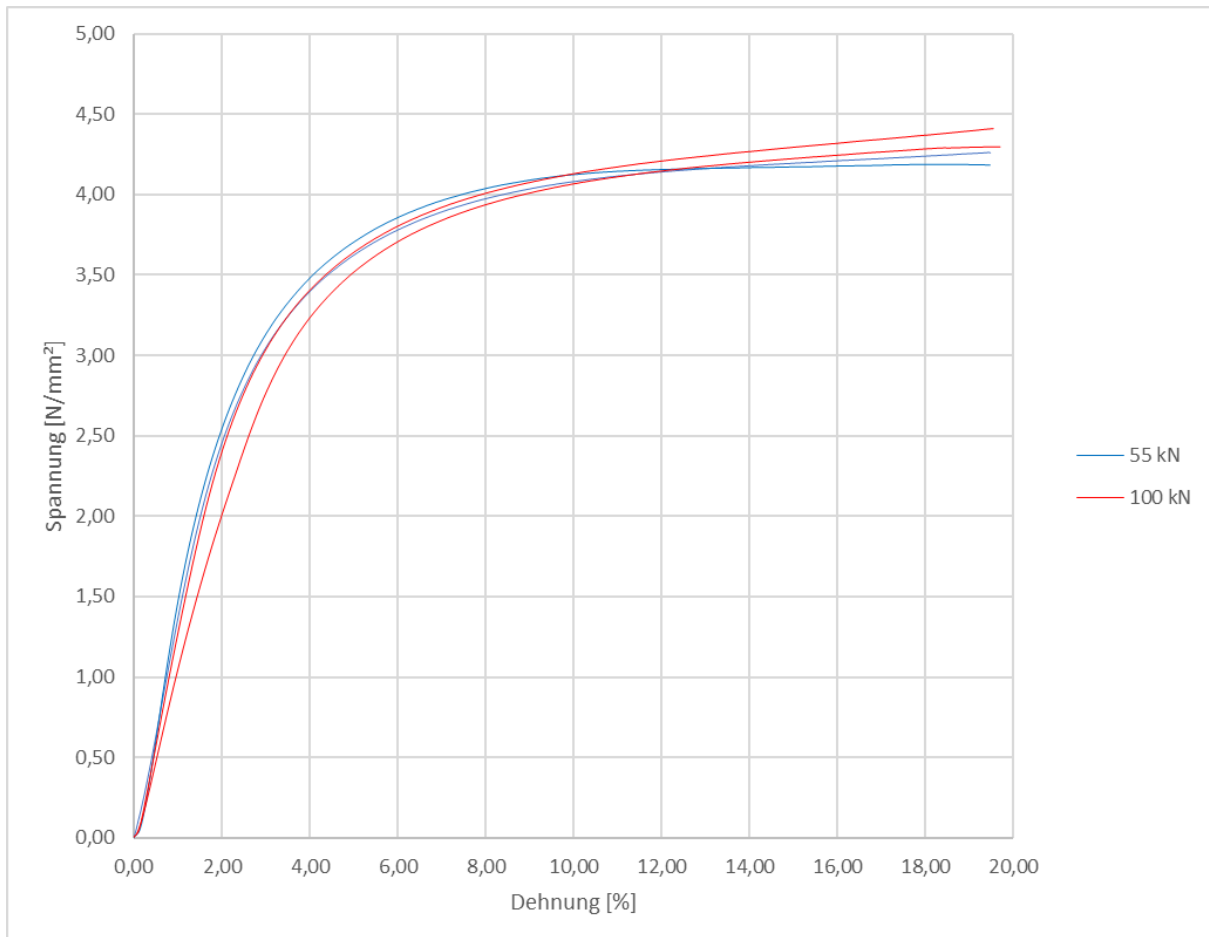


Abbildung 4-26: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien bei Druckkräften zwischen 55 kN und 100 kN bei einer Herstelltemperatur $T=40^{\circ}\text{C}$

In dieser Versuchsreihe sind von 55 kN auf 100 kN die Spannungs-Dehnungs-Linien nahezu identisch. Im niedrigen Dehnungsbereich weisen die Probekörper, die bei 100 kN verpresst wurden, eine geringere Druckfestigkeit auf, was jedoch vernachlässigbar ist. Somit wird festgehalten, dass eine hohe Druckkraft bei der Herstellung der Wachsschalungen keine positiven Auswirkungen auf die Druckfestigkeit der Wachsproben hat.

4.2.2.4 Zusammenfassung

Die drei Versuchsreihen haben gezeigt, dass sowohl die Steigerung der Temperatur als auch eine Erhöhung der Presskraft positive Auswirkungen auf die Druckfestigkeit der Wachsprüfkörper haben. Ebenfalls wurde deutlich, dass die Temperatur im Vergleich zur Presskraft einen größeren Einfluss auf die erzielten Festigkeiten der Wachsprüfkörper hat. Eine Steigerung der Presskraft auf über 55 kN oder eine Erhöhung der Temperatur auf über 40 °C haben keine Steigerung der Druckfestigkeit zur Folge und sind somit nicht zielführend für den Herstellungsprozess. Bei 40 °C und 50-55 kN weisen die Wachsprüfkörper ihre maximale Festigkeit auf. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird in den weiterführenden Versuchen zu den zuvor genannten Parametern noch eine weitere

Parameterkombination (20 °C und 30-35 kN) untersucht. Wie zuvor erwähnt, muss das Maximum nicht das Optimum für den zu erforschenden Herstellungsprozess sein. Es wird neben den optimalen Prozessparametern so noch eine wirtschaftliche Alternative untersucht, um ohne Erwärmung und mit moderaten Presskräften gepresste Wachskörper herstellen zu können.

4.2.3 Weiterführende Untersuchungen

4.2.3.1 Einfluss der Prüfkörpergeometrie

Die Wahl der Probenhöhe wurde in Anlehnung an die Norm für die Druckfestigkeitsuntersuchungen auf 15 cm festgelegt. Diese Probenhöhe ergibt ein Verhältnis von Höhe zu Breite von 1,5. Im zu erforschenden Herstellungsprozess werden Wachrohrlinge mit einer Höhe von ca. 50 cm zu erwarten sein, was bei einem Durchmesser von 1,0 m ein Verhältnis von Höhe zu Breite von 0,5 ergibt. Aus diesem Grund und aufgrund der Tatsache, dass die Festigkeit bei niedrigen Temperaturen über die Höhe abnimmt (vgl. Abbildung 4-22 rechts) wird in diesem Kapitel der Einfluss der Prüfkörpergeometrie auf die Druckfestigkeit der Prüfkörper untersucht. Zur Reduzierung der Höhe (7,5 cm statt 15 cm aus der ersten und zweiten Versuchsreihe) der zylindrischen Prüfkörper werden mit Hilfe der quadratischen Pressform Würfel mit einer Seitenlänge von jeweils 12 cm gepresst.

Anhand der Probekörper mit halber Höhe wird untersucht, wie groß der Einfluss unterschiedlicher Verdichtung über die Höhe des Probekörpers ist. Da der Wachskörper nur halb so hoch ist, wurde im Vergleich zu den Probekörpern der ersten und zweiten Versuchsreihe die Hälfte der Wachsmenge verwendet. Durch die Reduzierung der Prüfkörperhöhe müssen beim Pressprozess die oberen Wachsspäne einen kürzeren Weg zurücklegen, sodass sich die Wandreibung reduziert und sich somit eine einheitliche Druckfestigkeitsverteilung über die Höhe der Prüfkörper einstellen sollte.

Ähnlich wie bei der Prüfung von Betonproben werden Würfel hergestellt, um die Unterschiede zwischen Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit zu ermitteln. Folgende Proben wurden hergestellt:

- Zylinder mit halber Höhe, 20 °C und 35 kN: 3 Proben
- Zylinder mit halber Höhe, 40 °C und 55 kN: 3 Proben
- Würfel mit 12 cm Kantenlänge, 20 °C und 35 kN: 3 Proben
- Würfel mit 12 cm Kantenlänge, 40 °C und 55 kN: 3 Proben

Aufbauend auf den Versuchsergebnissen aus 4.2.2.4 werden die zylindrischen Prüfkörper mit halber Höhe sowie die Prüfkörper in Würfelform bei 20 °C und 35 kN sowie 40 °C und 55 kN hergestellt.

Erkenntnisse aus der Herstellung

Der Herstellungsprozess für die zylindrischen Prüfkörper mit halber Höhe sowie die Prüfkörper in Würfelform ist identisch mit dem Herstellungsprozess in 4.2.2. Zur Herstellung der Prüfkörper in Würfelform wurde lediglich die quadratische Pressform (vgl. Abbildung 4-3) verwendet. Der Aufbau der quadratischen Pressform ist prinzipiell identisch mit jenem der zylindrischen Pressform.

Druckfestigkeitsprüfung

Da die Verformungen während der Druckfestigkeitsuntersuchungen der Wachsprüfkörper schlecht eingeschätzt werden konnten, wurde die maximal zulässige Verformung auf 50 mm erhöht. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde wie in den Versuchen zuvor mit 2,5 mm/min beibehalten. Bei den Würfeln wurde eine Vorschubgeschwindigkeit von 6 mm/min gewählt. Das entspricht der Geschwindigkeit, wie sie in der Norm für die Druckprüfung von Kunststoffen (DIN EN ISO 604 [104]) vorgeschrieben ist. Für die Prüfung von viereckigen Kunststoffen wird dort eine Vorschubgeschwindigkeit von $0,5 \cdot h$ empfohlen, wobei h die Höhe in Zentimeter angibt. Die Geschwindigkeit für die Zylinder mit 7,5 cm Höhe bleibt bei 2,5 mm/min. Weitere Parameter wurden nicht geändert.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Ergebnisse

Im nachfolgenden Diagramm ist ein Vergleich der Proben mit 15 cm und 7,5 cm Höhe dargestellt.

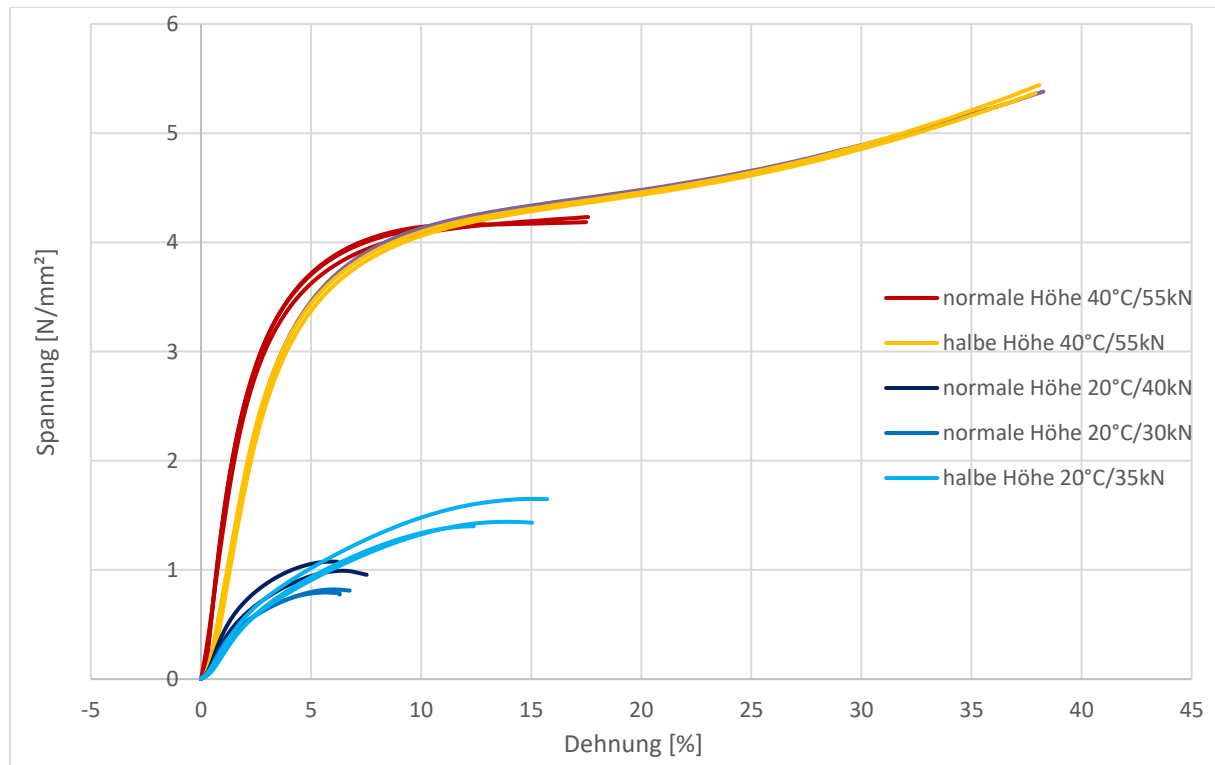


Abbildung 4-28: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien bei halber und normaler Höhe

Es ist erkennbar, dass die Unterschiede zwischen den Probekörpern mit halber und normaler Höhe gering sind. Bei 40 °C weisen die Proben mit normaler Höhe bei 5 % Dehnung bessere Druckfestigkeiten auf. Bei 20 °C werden die Proben mit halber Höhe mit einer Presskraft von 35 kN hergestellt. Um sie mit den normalhohen Proben zu vergleichen, werden im Diagramm die Probekörper mit 30 kN und 40 kN abgebildet, da in der ersten Versuchsreihe (vgl. 4.2.2.1) die Presskraft von 35 kN bei 20 °C nicht untersucht wurde. Im Bereich bis 5 % Dehnung liegen die Linien der bei 35 kN gepressten Prüfkörper mittig zwischen den Probekörpern bei 30 kN und 40 kN. Unterschiedliche Druckfestigkeiten sind nicht erkennbar. Die Probekörper mit halber Höhe können insgesamt größere Kräfte aufnehmen, allerdings werden die Dehnungen dabei groß. Das ist damit zu erklären, dass die Wachskörper mit einer Höhe von ca. 7,5 cm bei großer Verdichtung so stark zusammengedrückt werden, dass das Material nicht mehr zur Seite ausweichen kann. Die Neigung der Spannungs-Dehnungs-Linien bei halber Höhe und 40 °C wird bis 15 % Dehnung kleiner und fängt darüber wieder an zu steigen. Es entstehen kleine Risse am Rand des Probekörpers (Abbildung 4-27). Diese Erkenntnisse sind für die Praxis nicht von Belang, da solch hohe Dehnungen nicht zulässig sind. Wichtiger ist die Erkenntnis, dass die Probenhöhe keinen sichtbaren Einfluss auf die Druckkraftfestigkeit bei geringen Dehnungen hat. In der Praxis können somit Wachsschalungskörper mit größeren Höhen problemlos hergestellt werden, um z. B. Negativformen von Betonbauteilen (speziell Stützen) herzustellen, die eine große Querschnittsfläche besitzen.



Abbildung 4-27: Bruchbild des Probekörpers T40D5,5 mit einer Höhe von 7,5 cm

Die Prüfkörper in Würfelform werden bei 20 °C mit 35 kN und bei 40 °C mit 55 kN hergestellt. Da die Würfel nicht die gleiche Fläche wie die Zylinder aufweisen, werden die Druckkräfte in Druckspannungen umgerechnet. Eine Druckkraft von 35 kN auf einen Würfel mit einer Kantenlänge von 12 cm entspricht einer Druckspannung von 2,43 N/mm², was bei den Zylindern mit einem Durchmesser von 10 cm einer Druckkraft von ungefähr 20 kN gleichkommt. Eine Druckkraft von 55 kN auf einen der Würfel entspricht einer Druckkraft von 30 kN auf einen der Zylinder.

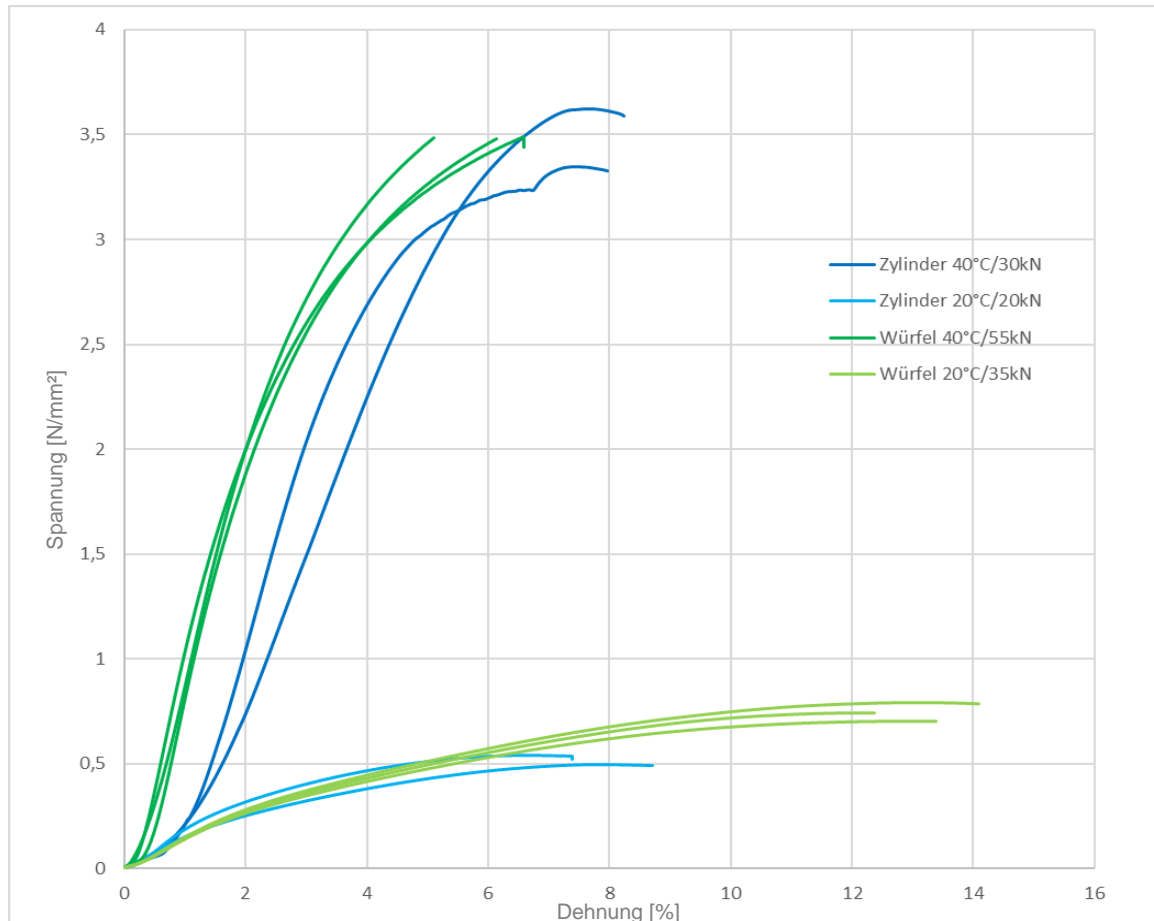


Abbildung 4-29: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien zwischen Prüfkörpern in Würfel- und Zylinderform

Anhand des folgenden Diagrammes werden die Unterschiede zwischen zylindrischen und kubischen Wachskörpern erläutert. Es ist erkennbar, dass bei den Prüfkörpern, die im unteren Druck- und Temperaturbereich hergestellt wurden, kein großer Unterschied zwischen Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit besteht. Ab einer Dehnung von 6 % übersteigt die Würfeldruckfestigkeit die Betondruckfestigkeit. Bei den Prüfkörpern, die bei 40 °C hergestellt wurden, ist die Würfeldruckfestigkeit von Beginn an größer. Das liegt daran, dass sich bei den Würfeln die Reibungswiderstände durch die obere und untere Prüfplatte überlagern und im mittleren Bereich des Prüfkörpers die Querdehnung verhindert wird. Risse können sich nicht gut ausbreiten, was zu einer besseren Druckfestigkeit führt. [102] Die Druckprüfung der Würfel bei 40 °C und 55 kN wird bei einer Druckspannung von ca. 3,5 N/mm² abgebrochen, da dort die maximale Druckkraft der Prüfmaschine von 50 kN erreicht ist. Deshalb weisen die Würfel bei 40 °C im Gegensatz zu den Würfeln bei 20 °C kaum Risse auf.

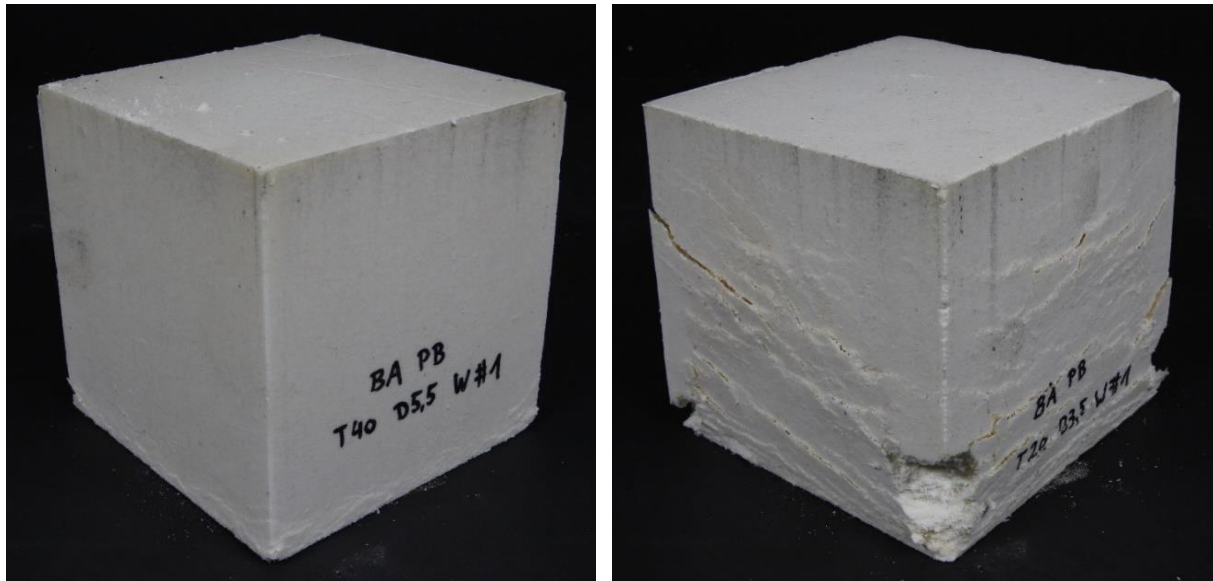


Abbildung 4-30: Darstellung der kubischen Prüfkörper nach der Druckfestigkeitsuntersuchung - T40D5,5 geringe Rissbildung; T20D3,5 starke Rissbildung (v. l. n. r.)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl die Höhe als auch die Form der Prüfkörper keinen nennenswerten Einfluss auf die Druckfestigkeit gepresster Wachskörper haben.

4.2.3.2 Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern

Das Kriechen von Werkstoffen bezeichnet eine zeit- und temperaturabhängige plastische Verformung unter konstanter Last. Da Beton nach dem Einbringen in die Schalung fließfähig ist, übt er während des Erhärtungsprozesses eine Druckbelastung infolge des Frischbetondrucks auf die Schalhaut aus. Je nach Betonzusammensetzung kann dieser Erhärtungsprozess mehrere Stunden bis hin zu einigen Tagen dauern. Mit zunehmender Festigkeitsentwicklung des Betons (während des Erhärtungsprozesses) nimmt diese Druckbelastung auf die Schalhaut stetig ab.

Um gepresste Wachskörper in Zukunft erfolgreich als Schalungsmaterial einsetzen zu können, muss neben den Druckfestigkeitsuntersuchungen zudem das Kriechverhalten des gepressten Wachses untersucht werden. Es muss sichergestellt werden, dass die zulässigen Verformungen trotz der anhaltenden Belastung des Wachses durch den Frischbetondruck während des Erhärtungsprozesses die gestellten Anforderungen des Herstellverfahrens erfüllen. In [9] wurde ein stark fließfähiger UHPC ND-2,5 einem Knetbeuteltest nach DIN 18218 [82] unterzogen mit dem Ergebnis, dass sich der Beton nach $\Delta t = 13$ h nicht mehr händisch formen lies und somit als formstabil zu betrachten war. Ab dem Zeitpunkt $\Delta t = 13$ h übte der UHPC keinen Frischbetondruck mehr auf die Schalung aus. Dieser händische Test zur Untersuchung des Erstarrungsendes ist ungenau. Da das Erstarrungsende von Beton jedoch nicht normativ geregelt ist und laut Hersteller der Beton UHPC ND-2,5 ein Erstarrungsende von ca. 12 h aufweist, wurde in den nachfolgenden Versuchen eine Prüfzeit von 12 h festgelegt. Der Versuchsaufbau entspricht den Druckfestigkeitsversuchen in 4.2.2 und wurde mit derselben Universalprüfmaschine (vgl. Abbildung 4-18) durchgeführt. Bei diesen Langzeituntersuchungen wurde die Prüfmaschine im Gegensatz zum weggesteuerten Prüfverfahren zur Untersuchung der Druckfestigkeit kraftgesteuert geregelt, hielt die Prüfkraft über den gesamten Prüfzeitraum konstant und maß die dadurch entstehenden Verformungen über die Zeit. Die Prüfkraft wurde aus den Anforderungen (vgl. 3.5) abgeleitet und betrug als charakteristischen Wert $\sigma_{hk} = 0,25 \frac{N}{mm^2}$. Bezogen auf die zylindrische Fläche des Prüfkörpers ergab dies eine Kraft von $F_k = 1963,5$ N. Diese Langzeitversuche wurden dreimal durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-31 dargestellt und geben den Mittelwert der jeweiligen Prüfkörper wieder.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

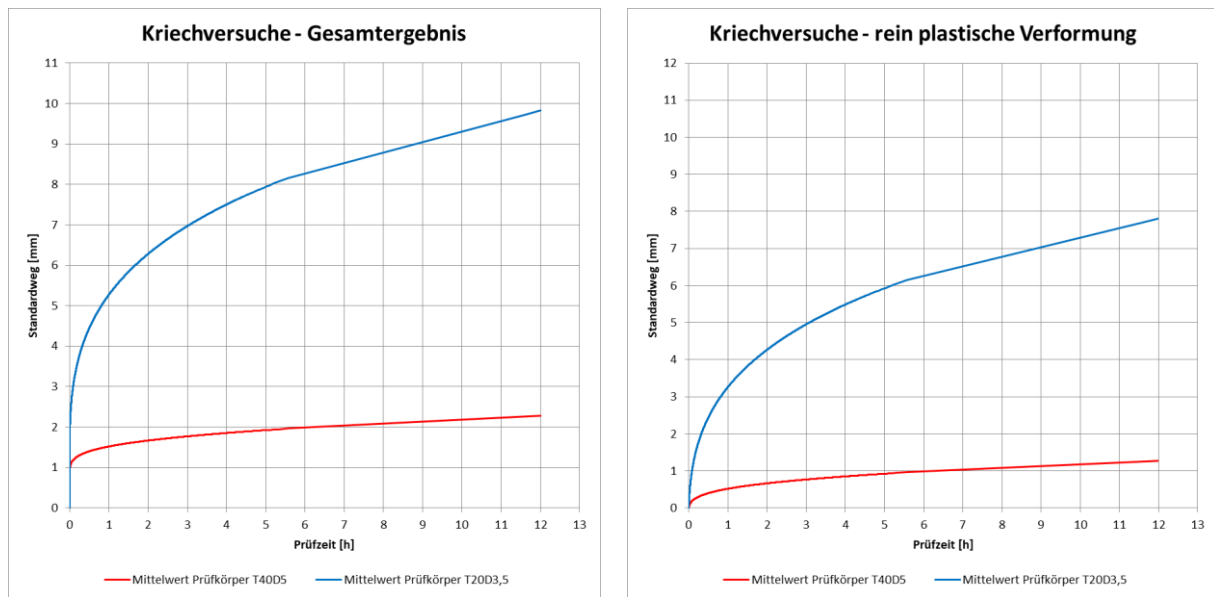


Abbildung 4-31: Darstellung der Ergebnisse der Kriechversuche, Verformung der Prüfkörper unter konstanter Last (gemittelt)

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass die Prüfkörper mit den Herstellparametern T20D3,5 im Vergleich zu den Prüfkörpern mit den Herstellparametern T40D5 bei gleicher Belastung über die Zeit größere Verformung erfahren. Diese Versuche hängen direkt mit den Versuchsergebnissen der Druckfestigkeitsuntersuchungen zusammen. Besitzen Prüfkörper höhere Druckfestigkeitswerte, hat dies einen positiven Effekt auf die Verformungen unter konstanter Last. In Abbildung 4-31 ist links die gemessene Gesamtverformung über die Zeit bei konstanter Last aufgeführt. Da sich Verformungen aus einem elastischen Teil und einem plastischen Teil zusammensetzen, wird in Abbildung 4-31 rechts die elastische Verformung rausgerechnet. Dies ergibt eine maximale plastische Verformung der beiden Prüfkörpertypen von:

- T20D3,5 $f_{pl} = 7,81 \text{ mm}$
- T40D5 $f_{pl} = 1,27 \text{ mm}$

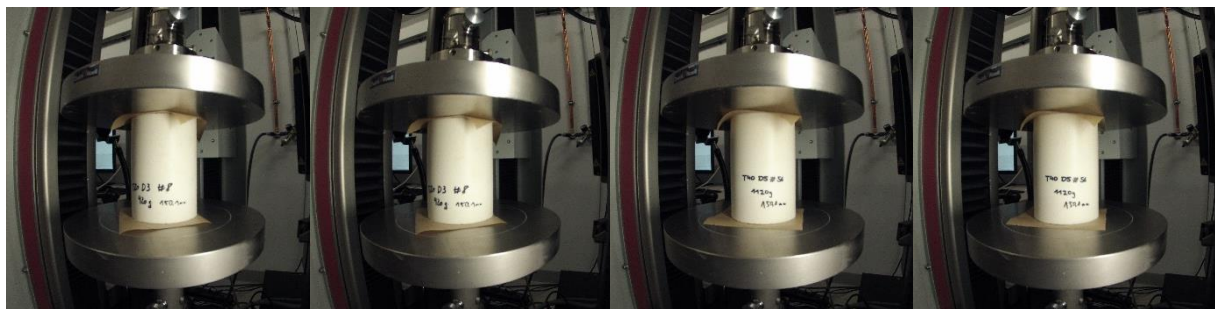


Abbildung 4-32: Darstellung der Kriechversuche vor und nach der Prüfung; T20D3 vor der Prüfung; T20D3 nach der Prüfung; T40D5 vor der Prüfung; T40D5 nach der Prüfung (v. l. n. r.)

Durch die Erhöhung der Herstelltemperatur sowie der Presskraft kann das Kriechverhalten des Wachsprüfkörpers verbessert werden. Es steht fest, dass, wie zuvor erwähnt, die Druckbelastung auf die Schalhaut über die Zeit sinkt. Diese Verringerung der Druckbelastung auf den Prüfkörper kann programmgesteuert durch die Prüfmaschine eingerichtet werden, jedoch gibt es derzeit keine aussagekräftigen Versuchsergebnisse hinsichtlich der Druckbelastung von Frischbeton (speziell UHPC) auf die Schalhaut über einen bestimmten Zeitraum. Da die maximale Druckbelastung über die Zeit konstant gehalten wurde, befinden sich die Versuche zum Kriechverhalten von gepressten Wachsprüfkörpern auf der sicheren Seite. Die tatsächlichen Verformungen werden aus diesen Gründen bei realen Bauteilen deutlich unter den Versuchsergebnissen liegen, da der Erstarrungsbeginn des UHPC laut Hersteller bei 2,5 Std. liegt und ab diesem Zeitpunkt die Druckbelastung stetig abnimmt.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

4.2.3.3 Zusatzstoffe im Wachs

Die Anschaffungskosten für das ConFormWax sind mit 4951 €/m³ (brutto), im Vergleich zu EPS-Hartschaum mit 80 €/m³, welches derzeit für Sonderschalungen benutzt wird, um ein Vielfaches höher. Am ITE wurde in Vorversuchen untersucht, ob das Wachs mit günstigeren Zusatzstoffen zu einem Compound gemischt werden kann, um a) die Kosten zu reduzieren und b) das Wachs widerstandsfähiger zu machen. [103]

In dieser Versuchsreihe wird geprüft, welchen Einfluss Zusatzstoffe im Wachs auf dessen Festigkeit haben. Im Folgenden werden Pulver aus Cellulose, Baumwolle und Kalksteinmehl mit dem Wachs trocken vermisch. Die Proben werden wie folgt beschriftet:

- Probekörper mit Cellulose: C
- Probekörper mit Baumwolle: BW
- Probekörper mit Kalksteinmehl: KSM
- Zusätzlich hinter den Buchstaben der Masseanteil in Prozent

Ähnlich wie Wachsspäne lassen sich Cellulospäne händisch zu Klumpen pressen. Bei Baumwollflocken ist dieses Phänomen nicht zu beobachten, weshalb davon auszugehen ist, dass kein guter Verbund beim Pressen zustande kommt. Aus diesem Grund wurden bei den Baumwollflocken jeweils nur eine Probe mit einem Masseanteil von 20 % bei mittlerer Temperatur und Druckkraft sowie bei optimaler Temperatur und Druckkraft untersucht (Tastversuch). Bei den Cellulospänen sowie dem Kalksteinmehl wurde der Masseanteil zwischen 10 %, 20 % und 30 % variiert. Daraus ergibt sich die folgende Versuchsmatrix, die die erstellten Prüfkörper darstellt:

Füllstoff und Massenanteil	Temperatur und Presskraft	
	20°C / 35kN	40°C / 55kN
Cellulose 10%	3 Proben	3 Proben
Cellulose 20%	3 Proben	3 Proben
Cellulose 30%	3 Proben	3 Proben
Kalksteinmehl 10%	3 Proben	3 Proben
Kalksteinmehl 20%	3 Proben	3 Proben
Kalksteinmehl 30%	3 Proben	3 Proben
Baumwolle 20%	1 Probe	1 Probe



Abbildung 4-33: Versuchsmatrix zur Untersuchung von Füllstoffen und deren Einfluss auf die Druckfestigkeit; gerissener Prüfkörper mit 50 % Cellulose-Masseanteil (v. l. n. r.)

Zu Beginn der Versuchsreihe war geplant, Wachskörper mit einem Masseanteil von 50 % Cellulose herzustellen, allerdings ist es bei einem derart hohen Cellulosegehalt nicht möglich, die Wachskörper aus der Pressform herauszunehmen. Das Verbundverhalten ist nicht ausreichend, sodass sie lediglich zerstört entnommen werden konnten (siehe Abbildung 4-33 rechts).

Erkenntnisse aus der Herstellung

Die Wachsspäne und die Zusatzstoffe wurden einzeln abgewogen und in einer Schüssel miteinander verrührt, bis sie homogen durchmischt waren.



Abbildung 4-34: Wachs (weiß) und Cellulose (gelb/braun) unvermischt, teilweise vermischt, homogen vermischt (v. l. n. r.)

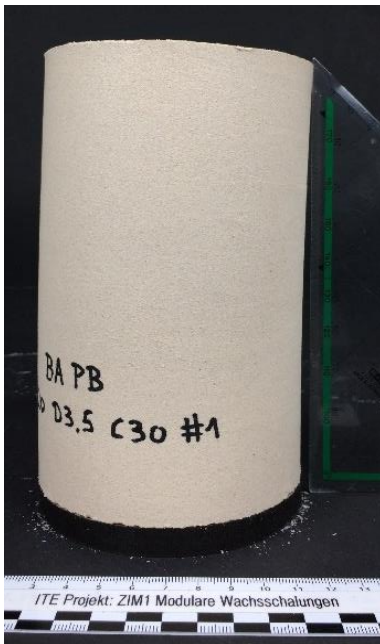


Abbildung 4-35: ungleichmäßige Ausdehnung bei 30 % Celluloseanteil

Vor allem bei der Cellulose kam es beim Mischvorgang zu einer erhöhten Staubentwicklung, sodass das Durchmischen mit einem motorisierten Mischer nicht zu empfehlen ist, solange der Mischbehälter nicht luftdicht verschlossen ist. Nach dem Mischen wurden die Späne im Ofen erhitzt und im Anschluss in die Pressform gefüllt. Dabei fiel auf, dass mit steigendem Anteil an Zusatzstoffen die eigenständige Verklebung des Wachses beim Erhitzen nachlässt. Ein Vorteil von Zusatzstoffen im Wachs ist, dass sich bei höheren Temperaturen eine bessere Verarbeitbarkeit einstellt und sich das Wachs-Compound einfacher in die Pressform einfüllen lässt. Für die durchgeführten Versuche ist diese Eigenschaft von untergeordneter Bedeutung, aber bei einem späteren industrialisierten Prozess können daraus Vorteile entstehen. Mit steigendem Anteil an Zusatzstoffen ist eine Ausdehnung der Wachskörper nach dem Entnehmen aus der Pressform zu beobachten. Vor allem die bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur hergestellten Proben dehnen sich ungleichmäßig aus und sind in ihrer vertikalen Achse nicht mehr gerade (Vergleiche Abbildung 4-35). Wird händischer Druck auf die Körper ausgeübt, lassen sich diese leicht zusammendrücken und weisen ein elastisches Verhalten auf.

Druckfestigkeitsprüfung

Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgte mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,5 mm/min. Da aufgrund der vorher festgestellten hohen Elastizität mit einer großen Verformung zu rechnen war, wurde die maximale Verformung der Prüfmaschine auf 50 mm gesetzt. Wie zuvor erwähnt, waren einige Probekörper nicht gerade, deshalb wurden die Druckplatten der Prüfmaschine so eingestellt, dass sie sich leicht neigen lassen. Somit konnte sich die Maschine den ungleichmäßigen Verformungen bestmöglich anpassen.

Während der Druckprüfung fiel auf, dass es bei den Prüfkörpern zu starken Abplatzungen kam, sodass sie nach der Druckprüfung wesentlich stärker beschädigt waren als Prüfkörper ohne Zusatzstoffe (vgl. Abbildung 4-18 rechts). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verformungen an Proben mit Füllstoffen deutlich größer sind und durch die Zusatzstoffe die Verbundkräfte im Inneren nachlassen, sodass durch Querdehnungen viel Material nach außen weggedrückt wird.

Ergebnisse

Im nachstehenden Diagramm sind die Spannungs-Dehnungs-Linien der beiden Proben mit Baumwolle sowie die Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper im gleichen Druck- und Temperaturbereich ohne Zusatzstoffe abgebildet.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Daraus geht hervor, dass die Proben mit Baumwolle je nach Temperatur und Druck unterschiedliches Verhalten aufweisen. Die Probe, die bei 20 °C und 35 kN gepresst wurde, zeigt einen fast linearen Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve und kommt erst bei einer Dehnung von 10 % bis 15 % auf die gleichen Festigkeitswerte wie die Prüfkörper ohne Zusatzstoffe. Letztere erreichen diese Festigkeit schon bei Dehnungen von ca. 5 %. Die Prüfkörper mit 20 % Baumwolle, die bei 40 °C und 55 kN hergestellt wurden, liegen ebenfalls unter der Spannungs-Dehnungs-Linie der Proben ohne Zusatzstoffe im gleichen Druck- und Temperaturbereich. Bei einer Druckspannung von ca. 6,4 N/mm² wurde der Prüfversuch abgebrochen, da damit die maximale Druckkraft von 50 kN der Prüfmaschine erreicht wurde. An diesem Punkt betrug die Dehnung schon mehr als 20 %, was für den Schalungsbau nicht zielführend ist. Werden jeweils im gleichen Druck- und Temperaturbereich die Druckfestigkeiten bei einer Dehnung von 5 % verglichen, erreichen die Proben ohne Zusatzstoffe bessere Festigkeiten. Bei höheren Drücken und Temperaturen nimmt die Differenz allerdings ab.



Abbildung 4-36: Starke Abplatzungen nach dem Prüfen vom Probekörper mit 10 % Cellulose

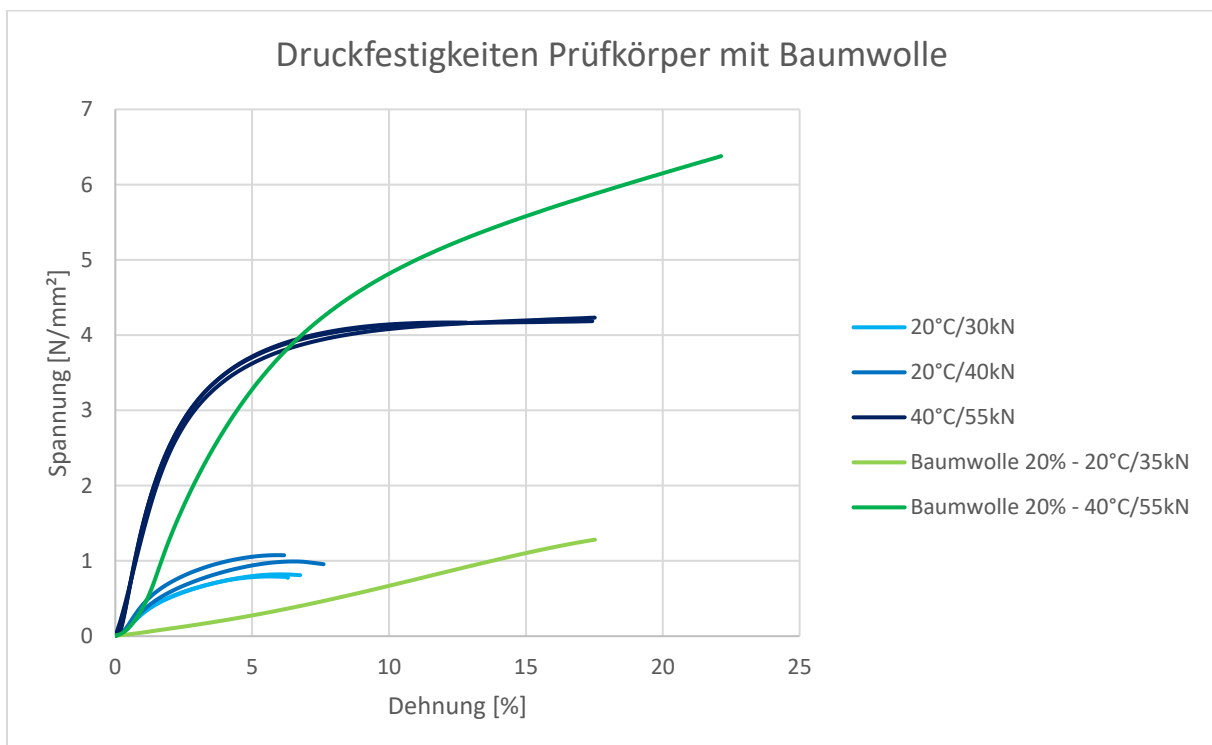


Abbildung 4-37: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien (Mittelwerte) der Prüfkörper mit Baumwolle und der Prüfkörper ohne Zusatzstoffe

Im nächsten Schritt werden die Prüfkörper mit Cellulose als Zusatzmittel mit den Proben aus dem gleichen Bereich ohne Zusatzmittel verglichen. Um die folgende Grafik übersichtlich zu gestalten, wird für die drei Proben ohne Zusätze bei 40 °C und 55 kN der Durchschnitt abgebildet. Für die Proben bei 20 °C und 30 kN sowie für jene bei 20 °C und 40 kN wird ebenfalls ein Durchschnitt gebildet, der mit Proben bei 20 °C und 35 kN vergleichbar ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Steigerung der

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Druckfestigkeit von 30 kN auf 40 kN gering genug ist, um als linear angenommen zu werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden zudem nur die gemittelten Ergebnisse der Prüfkörper mit Cellulose-Anteil grafisch dargestellt.

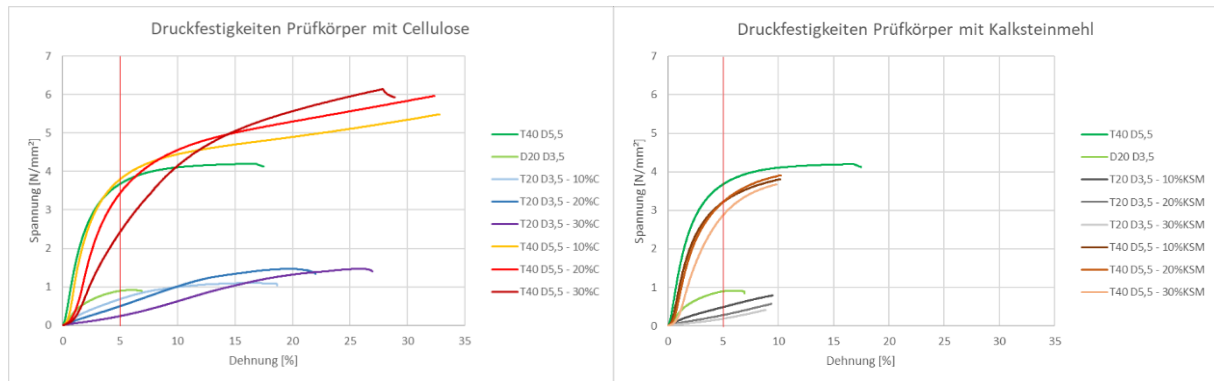


Abbildung 4-38: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien (Mittelwerte) der Prüfkörper mit Cellulose und der Prüfkörper ohne Zusatzstoffe; Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien (Mittelwerte) der Prüfkörper mit Kalksteinmehl und der Prüfkörper ohne Zusatzstoffe (v. l. n. r.)

Im Bereich bis ca. 5 % Dehnung liegen die Festigkeiten der Prüfkörper mit Cellulose deutlich unterhalb der Prüfkörper ohne Zusatzstoffe. Erst ab einer Dehnung von über 5 % überholen die Festigkeitswerte der Prüfkörper mit Cellulose die Prüfkörper ohne Zusatzstoffe. Der Grund dafür ist, dass die Cellulose im Wachs-Compound für eine größere Elastizität sorgt und die Prüfkörper stärker zusammengepresst werden müssen, bevor sie ihre endgültige Festigkeit aufbauen können. Im Bereich von 5 % Dehnung und niedriger Druckkraft und Temperatur weist die Probe ohne Zusatzstoffe (hellgrüne Linie) bessere Festigkeiten auf als die Prüfkörper mit Cellulose. Im höheren Druck- und Temperaturbereich gleicht die Druckfestigkeit des Prüfkörpers mit 10 % Cellulose (orangene Linie) bis zu einer Dehnung von 5 % jener ohne Füllstoffe (dunkelgrüne Linie). Durch die hohe Elastizität können die Prüfkörper mit Cellulose mehr Kraft aufnehmen als Prüfkörper ohne Zusatzstoffe. Die Probekörper mit 30 % Cellulose weisen insgesamt eine um ca. 50 % bessere Druckfestigkeit auf als die Proben ohne Zusatzstoffe. Jedoch ist zum Erreichen dieser Festigkeit eine fast doppelt so große Dehnung nötig.

Ein ähnliches Bild ergibt das Festigkeitsverhalten von Wachs-Kalksteinmehlmischungen (Abbildung 4-38 rechts). Die entsprechenden Versuche wurden aus Zeitgründen nach einer maximalen Dehnung von ca. 10 % abgebrochen, da diese hohen Dehnungen für Schalungsmaterialien unzureichend sind. Die Festigkeiten liegen bei allen Proben bei einer Dehnung von 5 % unter den Festigkeiten der Prüfkörper ohne Zusatzstoffe.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass trocken zugemischte Zusatzstoffe im Wachs nur dann sinnvoll eingesetzt werden können, wenn größere Dehnungen zulässig sind. Nur die Proben mit 10 % und 20 % Cellulose bzw. Kalksteinmehl, die bei 40 °C und 55 kN hergestellt wurden, sind im Bereich kleiner Dehnungen mit Wachskörpern ohne Zusatzstoffe vergleichbar.

Denkbar ist, Wachsschalungen mit trocken zugemischten Zusatzstoffen in den Bereichen einzusetzen, wo große Dehnung kein Hindernis darstellt. Zum Betonieren von Rohren könnte die innere Schalung beispielsweise aus einer Wachsmischung mit Zusatzstoffen hergestellt werden. Durch das Schwinden des Betons während des Erhärtungsprozesses müssen Innenschalungen in der Lage sein, sich diesen Kräften zu entziehen, ohne instabil zu werden, um das Bauteil nicht zu beschädigen. Durch den Einsatz von Wachs-Compound-Mischungen und die daraus resultierende hohe Elastizität bei gleichzeitig hoher Festigkeit kann dieses Problem in Zukunft gelöst werden, da die Oberflächenanforderungen an Innenseiten von Betonbauteilen eine untergeordnete Rolle spielen und damit große Verformungen zulassen. Solche Überlegungen sind theoretischer Natur, müssen genauer erforscht werden und werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

4.2.3.4 Zusatzstoffe in flüssigem Wachs

Das Problem, das von den Versuchen zum trockenen Einmischen von Zusatzstoffen in Wachs abgeleitet werden kann, ist, dass sich durch das *kalte* Zusammenpressen des Wachs-Compounds die Wachsspäne mit dem Zusatzstoff nur bedingt gut verbinden. Aus diesem Grund und aufgrund der Tatsache, dass durch den Einsatz von Zusatzstoffen die Wirtschaftlichkeit des gesamten Herstellungsverfahrens positiv beeinflusst werden kann, wird in dieser Versuchsreihe untersucht, ob ein werkseitiges Einmischen von Zusatzstoffen in das flüssige Wachs eine bessere Verbindung des Wachs-Compounds im gepressten Wachsrohling zur Folge hat.

In einem vom DFG geförderten Industrieforschungsvorhaben wird derzeit am ITE der Einfluss von Zusatzstoffen (Füllstoffe) in flüssigem Wachs untersucht, um hochpräzise, formstabile und kleinformatige Schalungskörper für den Bau von Maschinenbetten herzustellen. Anhand dieser Forschung konnte gezeigt werden, dass sich Kalksteinmehl hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, des maximalen Mischungsverhältnisses von über 50 M-% und des Einkaufspreises (Angabe laut Hersteller 67,50 €/m³ brutto) als zielführend erweist. Durch Gießen des heißen Waxes in Abkühlformen werden feste Wachskörper mit Zusatzstoffen hergestellt, die im Anschluss daran mittels Frästechnik zerspant werden. Nachteile dieses Verfahren sind, wie in 1.2 beschrieben, der thermische Schwund und der hohe benötigte Energiebedarf zum Schmelzen des Waxes. Vorteile zeigen sich in gesteigerten Festigkeiten, einer besseren Verarbeitbarkeit des Wachsgemisches sowie einer deutlichen Reduzierung des Materialpreises.

Das Ziel dieser Versuchsreihe ist es, die Vorteile durch Einmischen von Zusatzstoffen in flüssiges Wachs (bessere Verarbeitbarkeit und höhere Festigkeiten) mit den Vorteilen des Pressens von Wachs (wirtschaftlich, schnell, geringer Energieverbrauch) zu kombinieren.

Der Ausgangsstoff für diese Versuche waren Wachsspäne, in die der Zusatzstoff bereits eingearbeitet wurde. Dieser Ausgangsstoff kann derzeit nicht am Markt erworben werden und musste aus diesem Grund vor der Versuchsdurchführung hergestellt werden. Zur Herstellung von Wachsspänen mit eingearbeiteten Zusatzstoffen wurde eine bestimmte Menge Wachs über die Schmelzgrenze erhitzt und das Zusatzmittel anschließend eingerührt. Folgende Mengen wurden zur Herstellung des Ausgangsstoffes verwendet:

Wachs CFW (0,95 g/cm ³)	1995,00 g	(1995 g/0,95 g/cm ³ = 2100 cm ³) -> 50 Vol.-%
Kalksteinmehl (2,70 g/cm ³)	5670,00 g	(5670 g/2,70 g/cm ³ = 2100 cm ³) -> 50 Vol.-%



Abbildung 4-39: Herstellprozess der Wachsspäne mit eingearbeitetem Kalksteinmehl als Zusatzstoff; maschinelles Einrühren des Kalksteinmehl in das flüssige Wachs; Einfüllen des flüssigen Wachsgemisches in die Abkühlform; Zerspantung des kalten Wachsblocks zwecks Spanherstellung; hergestellte Wachsspäne mit eingearbeitetem Kalksteinmehl (v. l. n. r.)

Nach dem Einrühren von 50 Vol.-% Kalksteinmehl als Zusatzstoff in das flüssige Wachs wurde die flüssige Masse in eine Abkühlform gegossen und nach dem Abkühlprozess mit Hilfe der Fräse komplett zerspant, um möglichst viele pressbare Späne zu erhalten. Die Späne wurden im Nachgang zu

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

zylindrischen Prüfkörpern mit den in 4.2.2 bestimmten Herstellparametern gepresst. Da sich der Herstellungsaufwand für Wachsspäne mit eingearbeiteten Zusatzstoffen aufwendig darstellte und da diese Versuchsreihe als Tastversuchsreihe zu verstehen ist, wurden lediglich ein Prüfkörper bei T20D3,5 (Druckfestigkeitsuntersuchung) und zwei Prüfkörper bei T40D5 (Druckfestigkeitsuntersuchung und Kriechversuch) hergestellt. Dieser manuelle Mischprozess kann in Zukunft ohne großen Aufwand in den vollautomatischen Herstellungsprozess integriert werden, indem der Produzent bei der Herstellung des Wachses den Zusatzstoff direkt einmischt und das Produkt als Wachs-Compound vertreiben kann.

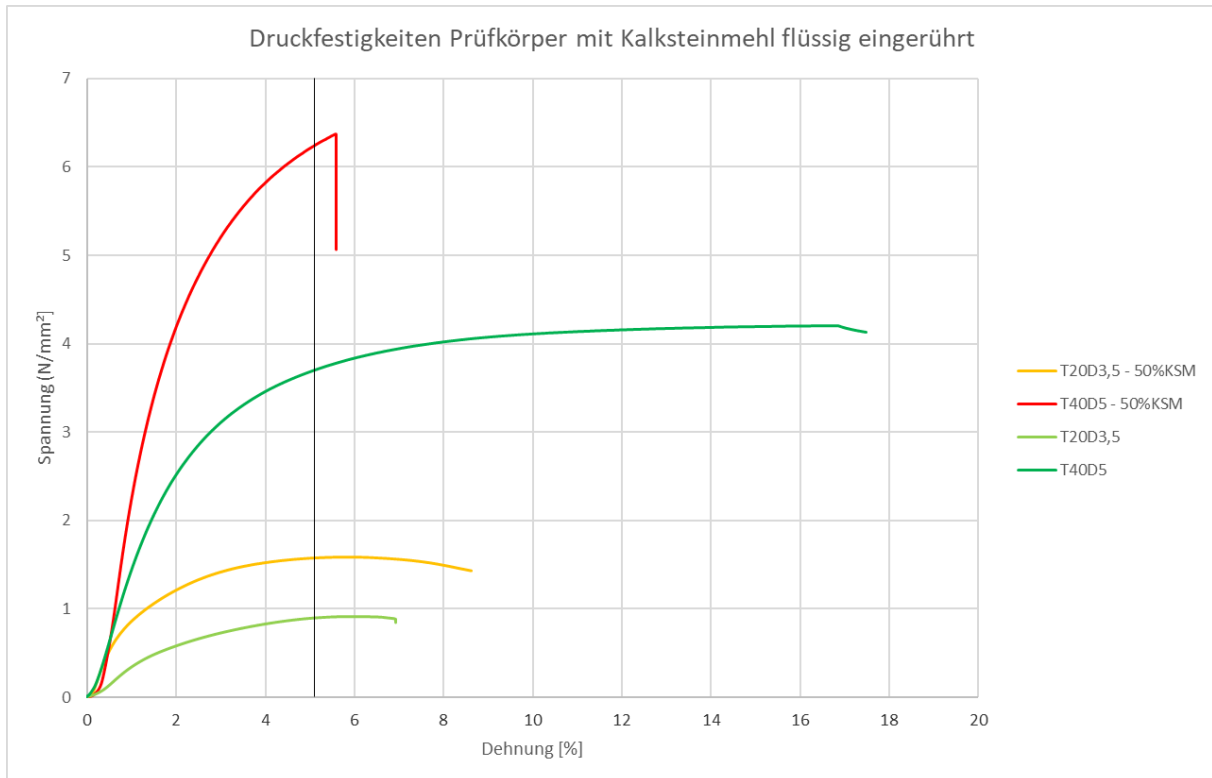


Abbildung 4-40: Darstellung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen zylindrischer Prüfkörper mit den Herstellparametern T20D3,5 und T40D5 sowie 50 Vol.-% Kalksteinmehl

Der Vergleich der Festigkeitswerte zwischen den Wachsprüfkörpern mit und ohne Zusatzstoff zeigt, dass sich durch das Einrühren des Zusatzstoffes in flüssiges Wachs der Füllstoff mit dem flüssigen Wachs kraftschlüssig verbindet, keine Störung im Gefüge mehr darstellt und so zu besseren Druckfestigkeiten führt (Abbildung 4-40). Werden die Druckfestigkeiten bei einer Dehnung von 5 % verglichen, zeigt sich, dass durch den Einsatz von Zusatzstoffen die Festigkeit um ca. 70 % gesteigert werden kann.

Druckfestigkeitswerte bei 5 % Dehnung:

- | | | | |
|--------------------|----|------------|---------|
| - T20D3,5 | -> | 0,90 N/mm² | |
| - T20D3,5 – 50%KSM | -> | 1,58 N/mm² | (+76 %) |
| - T40D5 | -> | 3,68 N/mm² | |
| - T40D5 – 50%KSM | -> | 6,21 N/mm² | (+69 %) |

Durch die erhöhten Druckfestigkeiten der Prüfkörper mit Zusatzstoffen wird im nächsten Schritt untersucht, ob die Zusatzstoffe ebenfalls einen positiven Einfluss auf das Kriechverhalten haben. Analog zu den Versuchen in 4.2.3.2 wird ein Prüfkörper über 12 h mit einer konstanten Druckspannung von $\sigma_{hk} = 0,25 \frac{N}{mm^2}$ belastet und die Dehnung wird maschinell gemessen. In Abbildung 4-41 wird deutlich, dass durch den Einsatz des Zusatzstoffes Kalksteinmehl bei einer Zugabe von 50 Vol.-% das Kriechverhalten positiv beeinflusst wird. Werden die rein plastischen Verformungen verglichen, zeigt

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

sich, dass sich die Verformung nach 12 h durch den Einsatz von 50 Vol.-% Kalksteinmehl als Zusatzstoff von $f_{pl,T40D5} = 1,27 \text{ mm}$ auf $f_{pl,T40D5-50\%KSM} = 0,42 \text{ mm}$ reduziert. Somit liegt sie weit innerhalb der technischen Anforderung von 3mm.

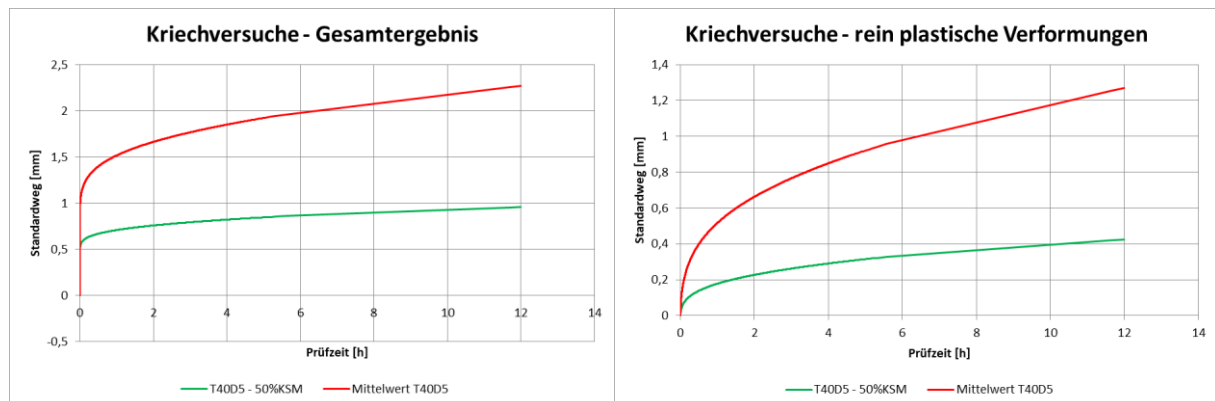


Abbildung 4-41: Darstellung der Ergebnisse der Kriechversuche, Verformung der Prüfkörper mit und ohne Zusatzstoffe unter konstanter Last

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich entgegen der Ergebnisse in 4.2.3.3 Zusatzstoffe in Kombination mit Wachs für den Schalungsbau aufgrund der Festigkeitssteigerung bei kleinen Dehnungen eignen. Das einmalige Einrühren des Zusatzstoffes in das flüssige Wachs stellt zwar zurzeit einen aufwendigen manuellen Herstellungsprozess der benötigten Wachsspäne dar, kann aber ohne großen Aufwand durch den Hersteller des Wachses in einen automatisierten Herstellungsprozess integriert werden, da das Wachs bei seiner Herstellung per se in flüssiger Form verarbeitet wird und das Einrühren des Zusatzstoffes keinen nennenswerten Mehraufwand darstellt. Durch die Substitution von 50 Vol.-% Wachs durch Kalksteinmehl können neben der Steigerung der Festigkeit die Investitionskosten reduziert werden. Ohne Zusatzstoff liegt der Preis des Wachses bei ca. 4951,00 €/m³ (brutto). Durch die Substitution reduziert sich der Preis auf 2509,25 €/m³ (brutto), was eine Einsparung von rund 50 % darstellt. Die Reduzierung des Investitionspreises für das Wachs stellt hinsichtlich eines automatisierten Prozesses den größten Vorteil dar. Lägen die Festigkeiten der Prüfkörper durch den Einsatz von Zusatzstoffen im gleichen Bereich wie Prüfkörper ohne Zusatzstoffe, wäre allein das aus wirtschaftlicher Sicht ein Grund, diese Möglichkeit weiter zu verfolgen. Durch den begrenzten Förderzeitraum im Projekt konnte dieser Ansatz nur in Form von ersten Tastversuchen untersucht werden, zeigt aber großes Potential für weitere Forschungen. Der Ansatz bietet in Zukunft die Möglichkeit, weitere Versuche hinsichtlich unterschiedlicher Zusatzstoffe und Mengen durchzuführen, um das verwendete Wachs noch wirtschaftlicher und robuster für den Einsatz als Schalungsmaterial zu machen.

4.2.3.5 Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper

Das Erwärmen von Wachsspänen vor dem Pressprozess hat den Nachteil, dass die Späne mit zunehmender Temperatur verkleben. Dies wirkt sich in einem automatisierten Prozess nachteilig auf die Förderung der Späne aus. In dieser Versuchsreihe wurde der Ansatz verfolgt, die Prüfkörper bei 20 °C Raumtemperatur mit verschiedenen Presskräften herzustellen und in einem temperierten Raum über einen festgelegten Zeitraum zu lagern, sodass sie sich mit der Zeit erwärmen und sich die gepressten Späne nachträglich *verkleben*. Diese Untersuchung gibt Aufschluss darüber, ob eine nachträgliche thermische Behandlung der Prüfkörper einen positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit hat. In einem automatisierten Prozess kann dies durch die Abwärme von bereits vor Ort stehenden Maschinen kostenneutral implementiert werden.

Da jedoch noch keine Erkenntnisse über die Wärmeleitfähigkeit gepresster Wachsprüfkörper vorhanden waren, wurde zu Beginn der Versuchsreihe mittig in einem gepressten Wachsprüfkörper ein Temperatursensor eingebaut, um die Kerntemperatur während des Temperierungsprozesses zu

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

messen. Zudem wurde an der Außenseite des Wachsprüfkörpers ein weiterer Temperatursensor angebracht, um die Temperaturentwicklung auf der Oberfläche zu messen. Dieser Prüfkörper wurde in einen temperaturgesteuerten Ofen gestellt und nacheinander bei konstanten Temperaturen von 30 °C, 40 °C und 50 °C so lange erwärmt, bis Kerntemperaturen von 30 °C, 40 °C bzw. 50 °C erreicht wurden. Da die Raumtemperatur im Sommer in der Versuchshalle bei ca. 21 bis 24 °C lag, hatten die Probekörper zu Beginn und nach dem Versuch nicht exakt 20 °C.

Die Versuchsergebnisse (Abbildung 4-42 und Abbildung 4-43) zeigen, dass gepresstes Wachs eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, da die kleinformatigen Prüfkörper je nach Temperaturstufe bis zu zwölf Stunden temperiert werden mussten, um im Kern die gewünschte Temperatur zu erreichen. Diese Tatsache ist später genauer zu betrachten.

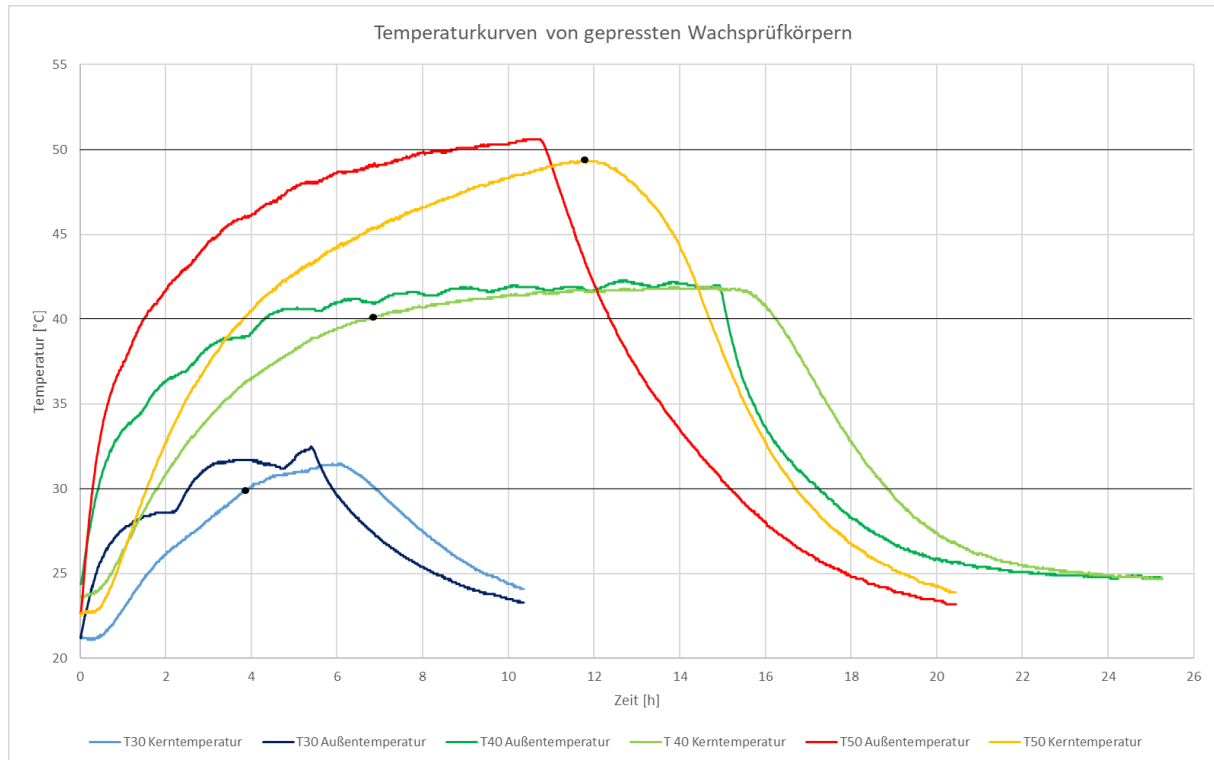


Abbildung 4-42: Darstellung der einzelnen Temperaturkurven in Abhängigkeit von der Erwärmungstemperatur

	Dauer Erwärmungsphase	Dauer der Abkühlphase
T30°C	4 Stunden	3 Stunden
T40°C	7 Stunden	5 Stunden
T50°C	>12 Stunden	5 Stunden

Abbildung 4-43: Dauer der Erwärmungs- und Abkühlphasen der einzelnen Prüfkörper in Stunden

Nach dem Abkühlprozess wurden die einzelnen Prüfkörper analog zu den Versuchen in 4.2.2 einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Jeder Prüfkörper (T30°C, T40°C und T50°C) wurde dreimal hergestellt, temperiert und abgekühlt. Die Presskräfte wurden in drei Schritten von 10 kN auf 30 kN und 50 kN gesteigert. Somit ergibt sich eine Prüfkörperanzahl von 27 (drei verschiedene Temperaturen x drei verschiedene Presskräfte x drei Stück pro Kombination). Um die Ergebnisse übersichtlich darzustellen, werden im Folgenden nur die gemittelten Versuchsergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen dargestellt.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

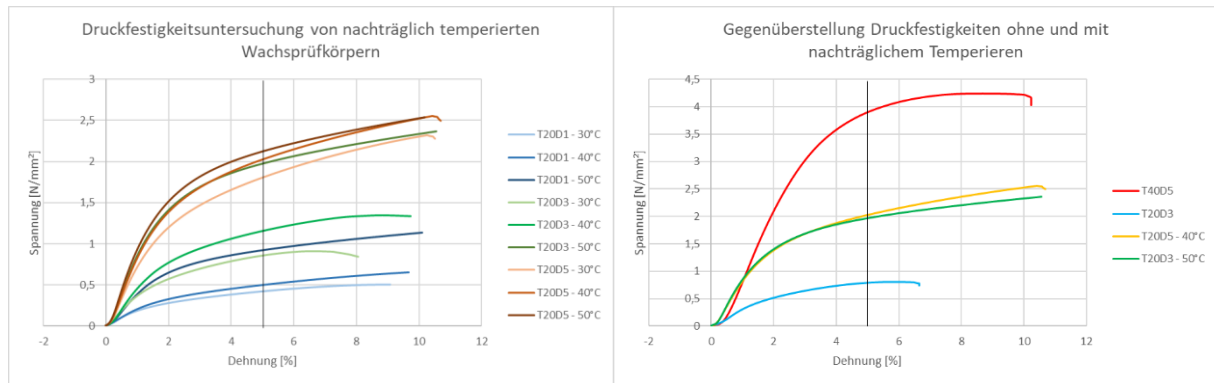


Abbildung 4-44: Darstellung der Druckfestigkeitsentwicklung der Prüfkörper, die nach der Herstellung temperiert wurden; Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten der Prüfkörper, die nachträglich temperiert wurden, mit Prüfkörpern, die nicht temperiert wurden (v. l. n. r.)

In Abbildung 4-44 (links) wird deutlich, dass speziell die Prüfkörper, die bei niedrigen Presskräften von 10 kN und 30 kN (blaue und grüne Linien) hergestellt wurden, eine Festigkeitssteigerung durch das nachträgliche Temperieren erfahren. Die Prüfkörper, die bei hohen Presskräften von 50 kN hergestellt wurden, zeigen kaum eine Festigkeitssteigerung durch das nachträgliche Temperieren. Werden die Ergebnisse dieser Versuche mit den Druckfestigkeitsversuchen aus 4.2.2 verglichen, bei denen die Wachsspäne vor dem Pressprozess erwärmt wurden, zeigt sich in Abbildung 4-44 (rechts), dass bei gleichen Presskräften und Temperaturen das Erwärmen von Spänen vor dem Pressprozess (T40D5, rote Linie) bessere Druckfestigkeiten der gepressten Wachsprüfkörper liefert als das nachträgliche temperieren von gepressten Prüfkörpern (T20D5 – 40°C, orangene Linie). Ist am Standort Abwärme durch Maschinen verfügbar und ist lediglich eine Presse mit niedriger Maximalpresskraft vorhanden, kann durch Nutzung dieser Energie eine Steigerung der Festigkeiten der gepressten Wachs Körper durch nachträgliches Temperieren erzielt werden. In Abbildung 4-44 (rechts) wird dieser Umstand verdeutlicht. Bei gleicher Herstelltemperatur und gleicher Presskraft (T20D3) kann durch das nachträgliche Temperieren der Prüfkörper die Festigkeit bei 5 % Dehnung von ca. 0,8 N/mm² (blaue Linie) auf ca. 2,0 N/mm² (grüne Linie) (+250 %) gesteigert werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich nachträgliches Temperieren von gepressten Wachs Körpern nur dann als zielführend erweist, wenn zum einen kostenneutrale Abwärme am Standort vorhanden ist, zum anderen nur eine Presse mit niedriger Maximalpresskraft verfügbar ist und schließlich das Erwärmen der Späne vor dem Pressprozess prozessbedingt nicht umgesetzt werden kann. Anhand der Temperaturkurven (Abbildung 4-42 und Abbildung 4-43) wird zudem deutlich, dass Prüfkörper mit einem Durchmesser von 100 mm bis zu 12 h temperiert werden müssen, um die geforderte Kerntemperatur zu erreichen und damit die Festigkeiten zu steigern. Werden diese Zeiten auf einen Wachsrohling mit einem Durchmesser von 1000 mm skaliert, werden schnell Temperierungszeiten bei linearer Betrachtung von 120 h, sprich fünf Tage, erreicht, was zur Folge hat, dass eine hohe Anzahl an gepressten Wachsrohlingen vorgehalten werden muss, um einen voll automatisierten Produktionsprozess mit stetiger Produktion zu ermöglichen. Aufgrund dieses enormen Zeit- und Platzbedarfs sowie geringeren Festigkeiten als jenen von Prüfkörpern, die mit erwärmten Spänen hergestellt wurden, ist dieser Ansatz für einen späteren automatisierten und wirtschaftlichen Herstellungsprozess als nicht zielführend einzustufen und wird aus diesen Gründen nicht weiterverfolgt.

4.2.3.6 Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper

Die Maßhaltigkeit der herzustellenden Betonbaukörper hängt von der Beschaffenheit der Oberflächenfestigkeit der Schalhaut ab. Die zuvor durchgeführten Versuche hinsichtlich der allgemeinen Druckfestigkeit von Wachsprüfkörpern haben gezeigt, dass sich das Material grundsätzlich als Schalungsmaterial eignet. Jedoch können durch den Gebrauch von Betonsorgen mit großem Größtkorn während der Betonage sowie durch den Einsatz maschineller Rüttler hohe, punktuelle Belastungen auf lokale Bereiche der Schalhaut einwirken. Zudem können mit Hilfe der vorhandenen Pressformen (Abbildung 4-15) keine Wachsprüfkörper hergestellt werden, die die Anforderungen nach DIN EN 196-1 [107] erfüllen, um belastbare Biegezugfestigkeitsversuche durchzuführen und daraus Rückschlüsse auf das E-Modul ziehen zu können.

Aus diesem Grund wurde in Anlehnung an die EN ISO 2039 [108] die Oberflächenhärte des Waxes untersucht. Dieser Versuch sieht vor, eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 5 mm unter einer definierten Prüflast in die Oberfläche des Werkstücks zu drücken. Wie in den Versuchen zuvor wurden in diesen Versuchen Prüfkörper mit den als zielführend festgelegten Parametern (T20D3 und T40D5) verwendet. Mit Hilfe der Eindringtiefe kann die Oberfläche des Eindrucks (Fläche eines Kugelabschnitts) berechnet werden. Die Kugeleindruckhärte (HB in N/mm^2) wird laut Norm durch den Quotienten aus aufgebrachter Prüfkraft $[N]$ und Oberfläche des Eindrucks $[mm]$ berechnet. Der Durchmesser der Stahlkugel beträgt 5 mm und die Eindringtiefe h_1 der Kugel muss zwischen 0,15 mm und 0,35 mm liegen. Die Messpunkte auf der Oberfläche müssen mind. 10 mm vom Rand sowie 10 mm von jedem weiteren Messpunkt auf Oberfläche entfernt sein. Zu Beginn der Prüfung wurde eine Vorlast F_0 von 9,8 N aufgebracht. Der Wert der Eindringtiefe wird auf 0 gesetzt und im Anschluss wird über zwei bis drei Sekunden die Prüflast F_m aufgebracht. Die Eindringtiefe U wird unter konstanter Belastung des Werkstücks durch die Prüflast nach 30 Sekunden gemessen. Die Prüflast F_m ist aus den folgenden Werten so zu wählen, dass die Eindringtiefen im Bereich zwischen 0,15 mm und 0,35 mm liegen.

49,0 N; 312 N; 358 N; 961 N

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wird empfohlen, zehn Versuche an einer Probe durchzuführen und zu mitteln. Vortests haben ergeben, dass die kleinste Prüfkraft von $F_m = 49,0$ N bei Prüfkörpern, die bei 20 °C und einer Presskraft von 30 kN gepresst wurden, Verformungen über 0,35 mm verursacht. Aus diesem Grunde wurde die Prüflast linear nach unten auf $F_m = 18,2$ N erweitert.

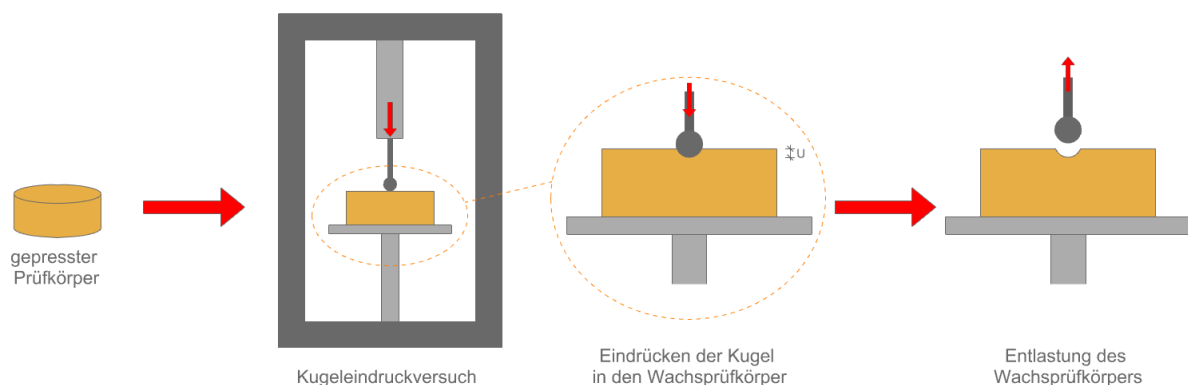


Abbildung 4-45: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Durchführung des Oberflächenfestigkeitsversuchs (Kugeleindruckversuch)

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen



Abbildung 4-46: Darstellung des Versuchsaufbaus mit Prüfkörper in der Universalprüfmaschine; Fotoausschnitt während der Prüfung mit Eindringkugelhalter; computerunterstützte Auswertung der Versuchsergebnisse (v. l. n. r.)

Um die Verformungen des Prüfgestells (Aufbiegen) zu berücksichtigen, wurde der gleiche Versuch mit der jeweiligen Prüflast an einem Kupferblock durchgeführt und die Eindringtiefe in den Kupferblock h_2 gemessen. In Abbildung 4-45 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Der visuelle Eindruck weist darauf hin, dass die kreisförmigen Oberseiten der zylindrischen Prüfkörper durch den Kontakt mit der stählernen Pressform eine höhere Festigkeit aufweisen als das gepresste Wachs im Inneren. Ebenso wird der Wachsrohling im späteren automatisierten Prozess mittels Zerspanung maschinell bearbeitet. Es kommen somit in Zukunft nur die Oberflächen der Wachsschalung mit Beton in Kontakt, die zuvor mittels Frästechnik bearbeitet wurden. Aus diesem Grund wurden durch Zerspanung die obersten 10 mm aller Prüfkörper abgefräst, um die Oberflächenfestigkeiten des gepressten Waxes im Inneren zu untersuchen. In Tabelle 4-4 sind die Versuchsergebnisse dargestellt.

Tabelle 4-4: Ergebnisse der Kugleindruckprüfung mit Darstellung der Eindringtiefen U verschiedener Prüfkörper in mm

Prüfkörper	T20D3			Kupfer	Eindringtiefe*	T40D5			Kupfer	Eindringtiefe*
Prüflast [N]	18,2					49				
Eindringtiefen	bei 18,2	bei 9,8N	Differenz (h_1)	bei 18,2 (h_2)	$h = h_1 - h_2$	bei 49N	bei 9,8N	Differenz (h_1)	bei 49N (h_2)	$h = h_1 - h_2$
Versuch 1	0,653	0,263	0,391	0,007		0,323	0,033	0,290	0,031	
Versuch 2	0,644	0,222	0,422	0,008		0,605	0,209	0,396	0,018	
Versuch 3	0,564	0,194	0,370	0,007		0,696	0,175	0,520	0,017	
Versuch 4	0,605	0,187	0,418			0,421	0,090	0,332		
Versuch 5	0,591	0,163	0,428			0,403	0,078	0,325		
Versuch 6	0,580	0,188	0,392			0,418	0,070	0,348		
Versuch 7	0,630	0,211	0,419			0,426	0,062	0,363		
Versuch 8	0,601	0,200	0,401			0,517	0,154	0,363		
Versuch 9	0,576	0,203	0,374			0,529	0,171	0,359		
Versuch 10	0,581	0,474	0,107			0,435	0,064	0,371		
Mittelwert	0,603	0,230	0,372	0,007	0,365	0,477	0,111	0,367	0,022	0,345

* die Eindringtiefe nach der Korrektur hinsichtlich der Aufbiegung des Gestells

Anhand der Versuchsergebnisse wird deutlich, dass die Grenze der maximalen Eindringtiefe bei den Prüfkörpern T20D3 um 0,015 mm überschritten wurde, obwohl speziell für diese Prüfkörper die Prüflast verringert wurde. Die Eindringtiefen der Prüfkörper T40D5 liegen laut Norm im zulässigen Bereich. Anhand der jeweiligen Eindringtiefe h_1 und der Prüflast F_m kann im Folgenden die Kugleindruckhärte HB bestimmt werden.

$$F_r = F_m \times \frac{0,21}{h - 0,25 + 0,21}$$

$$\text{mit } h = h_1 - h_2$$

$$HB = \frac{F_r}{\pi d h_r}$$

$$d = \text{Kugeldurchmesser (5mm)}, \quad h_r = \text{reduzierte Eindringtiefe (= 0,25mm)}$$

$$HB_{T20D3} = \frac{18,2N \times \frac{0,21}{0,365 - 0,25 + 0,21}}{\pi \times 5,0mm \times 0,25mm} = 2,995 \text{ N/mm}^2$$

$$HB_{T40D5} = \frac{49N \times \frac{0,21}{0,345 - 0,25 + 0,21}}{\pi \times 5,0mm \times 0,25mm} = 8,591 \text{ N/mm}^2 (+287\%)$$

Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass die Prüfkörper T40D5 höhere Oberflächenfestigkeiten besitzen als die Prüfkörper T20D3. Eine weitere Einordnung dieser Ergebnisse zum Vergleich mit anderen Werkstoffen wie Kunststoff etc. kann durch eine hohe Zahl verschiedener am Markt verfügbarer Werkstoffe kaum überschaubar dargestellt werden. Zudem ist ein Vergleich der Ergebnisse mit den Kugeleindruckhärten von harten und dichten Kunststoffen nicht zielführend, da diese Kunststoffe aus wirtschaftlichen Gründen nicht im Schalungsbau zum Einsatz kommen. Als Vergleichswert gibt ein Hersteller von Polystyrol (PS) als Kugeldruckhärte $HB = 150 \text{ N/mm}^2$ an [109], wobei angemerkt werden muss, dass es sich bei PS um den unverarbeiteten Kunststoff mit einer Dichte von $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$ handelt. Da derzeit, wie in 2.1.2 beschrieben, hauptsächlich extrudiertes (aufgeschäumtes) Polystyrol (EPS) mit einer Dichte von rund $\rho = 35\text{-}40 \text{ kg/m}^3$ für die Herstellung von Freiformbauteilen aus Beton zum Einsatz kommt, wird die Annahme getroffen, dass die Kugeldruckfestigkeit um das Verhältnis der Dichten ($1050 \text{ kg/m}^3 / 35 \text{ kg/m}^3 = 30$) der beiden Stoffe abnimmt. In der Literatur konnten keine Angaben zu Kugeleindruckhärten von EPS gefunden werden, da EPS hauptsächlich in der Wärmedämmung von Gebäuden zum Einsatz kommt und dort die Kugeleindruckhärte keine Rolle spielt. Die Kugeldruckhärte von EPS läge anhand dieser Annahmen bei $HB = 150 \text{ N/mm}^2 / 30 = 5 \text{ N/mm}^2$. Diese Annahme zeigt, dass speziell Wachskörper, die bei 40°C und unter $6,37 \text{ N/mm}^2$ (50 kN bei einer Fläche von $7853,98 \text{ mm}^2$) hergestellt werden, bessere Oberflächenfestigkeiten als EPS liefern. In späteren Großversuchen ist diese Eigenschaft bei der Verwendung von Rüttlern und/oder Betonen mit großem Größtkorn zu beachten und weiter zu untersuchen.

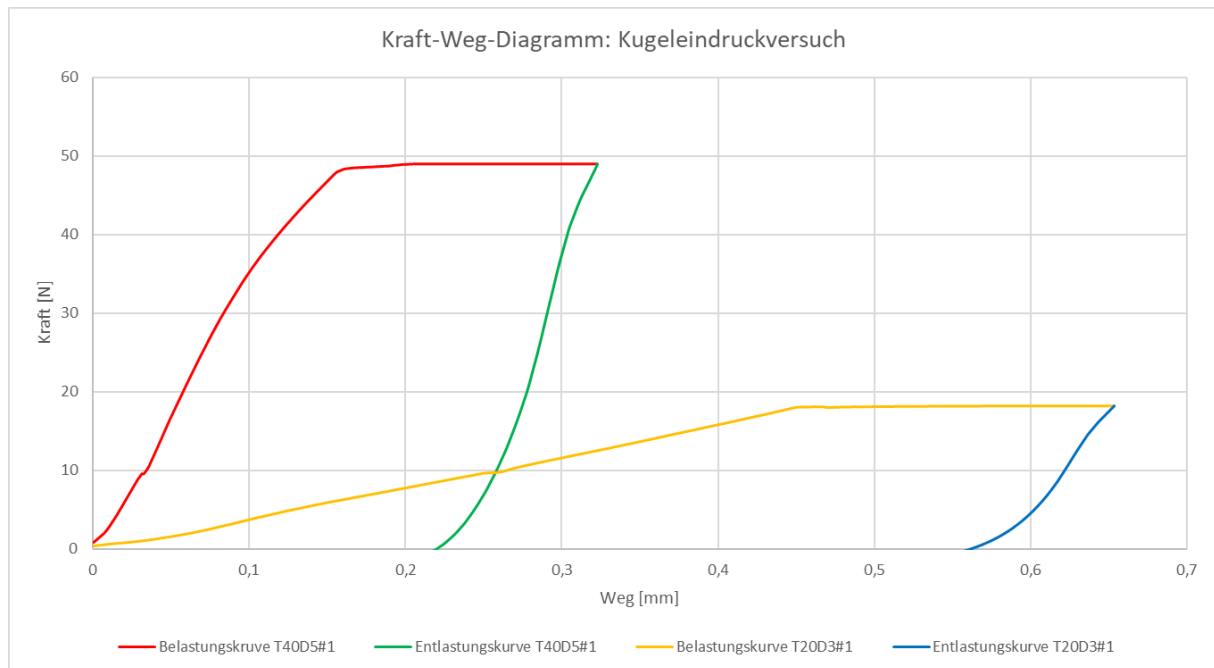


Abbildung 4-47: Darstellung der Versuchsergebnisse anhand eines Kraft-Weg-Diagramms am Beispiel zweier Prüfkörper T40D5#1 und T20D3#1. Der Versuch teilt sich in Belastung und Entlastung der Prüfkörper auf.

Wie zuvor erwähnt, kann anhand der Belastungskurve die Oberflächenhärte in Form der Prüfung der Kugeleindruckhärte berechnet werden. Die Entlastungskurve wird herangezogen, um das E-Modul des gepressten Wachsmaterials zu bestimmen. Die Basis dieser Betrachtung bildet die Eindrucktheorie basierend auf dem Hertzschen Modell [110], das den reibungslosen Kontakt zwischen zwei isotropen

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

und elastischen Werkstoffen beschreibt. Durch das Eindringen einer Stahlkugel in ein Material kann das E-Modul des Materials bestimmt werden. Folgende Formel beschreibt diese Abhängigkeit:

$$E_{Wax} = \left(\frac{S}{2x \sqrt{2x \left(U - \frac{3}{4} x \frac{F_m}{S} \right) x r - \left(U - \frac{3}{4} x \frac{F_m}{S} \right)^2}} \right) x (1 - P^2)$$

- E_{wax} = E-Modul des gepressten Wachsprüfkörpers
- S = Steigung der Entlastungskurve (Abbildung 4-47 grüne und blaue Linie)
- F_m = Prüflast laut Norm
- U = maximale Eindringtiefe der Kugel
- P = Poissonzahl (=0,45 Annahme)

In Tabelle 4-5 sind die Ergebnisse der Berechnung des E-Moduls für beide Wachsprüfkörper dargestellt. Wie zuvor wird auch hier der Unterschied zwischen den beiden Wachsprüfkörpern bezogen auf deren Festigkeit deutlich. Der Wachsprüfkörper T40D5 weist ein mehr als dreifach größeres E-Modul auf als der Prüfkörper T20D3. Wird das E-Modul des Prüfkörpers T40D5 $E = 174,69 \text{ N/mm}^2$ mit dem E-Modul des Ausgangsmaterials $E = 145,49 \text{ N/mm}^2$ [9] (E-Modul des Wachskörpers, der aus flüssigem Wachs gegossen wurde) verglichen, wird deutlich, dass das E-Modul des gepressten Wachses im Bereich des gegossenen Wachses liegt und dieses sogar übersteigt. Um eine fundierte Aussage über das E-Modul von gepresstem Wachs und flüssig in Form gegossenem Wachs zu treffen, ist es sinnvoll, eine höhere Anzahl an Versuchen durchzuführen.

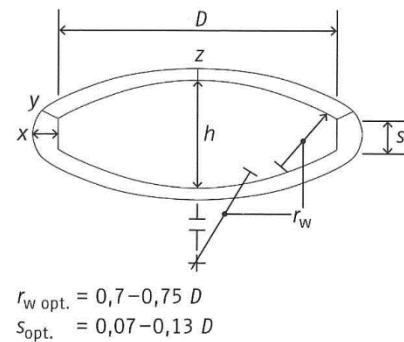
Tabelle 4-5: Darstellung der Ergebnisse der Berechnung des E-Moduls anhand der Entlastungskurve des Kugeleindruckversuches beider Wachsprüfkörper

	E-Modul [N/mm ²]	
	T20D3	T40D5
Versuch 1	53,71	220,78
Versuch 2	53,44	139,68
Versuch 3	59,82	130,49
Versuch 4	55,65	185,60
Versuch 5	55,19	193,93
Versuch 6	58,07	188,75
Versuch 7	51,54	179,47
Versuch 8	55,67	158,36
Versuch 9	58,34	159,75
Versuch 10	55,82	190,09
Gemittelt	55,72	174,69

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass diese Versuchsreihe gezeigt hat, dass die Oberflächenfestigkeiten von gepresstem Wachs über den Oberflächenfestigkeiten von EPS liegen. Gepresstes Wachs ist robuster als EPS und somit zielführend für die Anwendung im Schalungsbau. Auch die Analyse des aus der Entlastungskurve des Versuchs berechneten E-Moduls zeigt, dass gepresstes Wachs vergleichbare, zum Teil höhere E-Modulwerte aufweist und sich daraus kein Nachteil in Bezug auf den Gebrauch von gepresstem Wachs im Vergleich zu gegossenem Wachs ergibt.

4.2.3.7 Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit

Da es derzeit in der Industrie kaum vergleichbare Pressverfahren gibt, die Späne zu großvolumigen Körpern mit geringen Presskräften zusammenpressen, wird in diesem Abschnitt untersucht, ob die Stempelform einen Einfluss auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper hat. Die in Kapitel 4.2 für die Druckfestigkeitsuntersuchungen hergestellten Wachsprüfkörper sind mit einem Stempel mit kreisförmiger und flacher Unterseite gepresst worden. Es wird angenommen, dass durch die Wandreibung in der Pressform die Späne, die im Bereich der Wandung der Pressform liegen, durch diese Wandreibung *gestützt* und dadurch nicht optimal verpresst werden und somit kein homogenes Gefüge bilden. So könnte es zur Schwächung des Wachsprüfkörpers im Mantelbereich kommen. Bei den in 3.2.2 beschriebenen Pressverfahren für Tabletten werden oft kleinformatige Körper mit zum Teil großen Kräften zusammengepresst. Da bei solch hohen Presskräften die Wandreibung keinen Einfluss auf die Dichte und somit die Festigkeit der gepressten Körper hat, ist in der Literatur zu diesem Thema kaum eine Aussage zu finden. Lediglich bei der Herstellung von Tabletten [60, 61] kommen konkave (nach innen gewölbte) Stempelformen zum Einsatz. Der Grund für diesen Einsatz spezieller Stempel ist jedoch nicht die Überwindung der Wandreibung, sondern liegt in der zum Teil notwendigen Zuckerglasur von Tabellen. In der Literatur zur Tablettenherstellung sind Angaben zur optimalen Höhe der Wölbung der Stempelform zu finden, die für diese Versuchsreihe zur Anwendung kommen (Abbildung 4-48).



Mit Hilfe dieser Parameter für den Wölbungsradius r_w und den Durchmesser D (100mm bei Wachsprüfkörper) kann mit der Formel für die Segmenthöhe h_1 eines Kreisabschnitts die Höhe der Wölbung für die benötigte Stempelform bestimmt werden.

Abbildung 4-48: Optimale Drageekernformen für gleichmäßig dicke Zuckerüberzüge, D =Drageekerndurchmesser, h =Drageekernhöhe, S =Steghöhe, r_w =Wölbungsradius, y =minimale Dicke des Überzugs, x und z =maximale Dicke des Überzugs [60,61]

$$h_{\text{Wölbung}} = r_w - \frac{1}{2}x\sqrt{4xr_w^2 - D^2}$$

$$r_w = 0,7D \text{ bis } 0,75D = 70\text{mm bis } 75\text{mm}$$

$$h_{\text{Wölbung}} \cong 19\text{mm bis } 21\text{mm} \rightarrow 20\text{mm}$$

Somit muss die Höhe der Wölbung bei einem Durchmesser von 100 mm 20 mm betragen.

Ein weiterer Ansatz hinsichtlich einer zielführenden Höhe der Wölbung wird anhand der bei der B+S vorhandenen Presse untersucht. Der Stempel dieser Presse besitzt bei einem Durchmesser von rund 1000 mm eine konkave Wölbung von ca. 50 mm. Runterskaliert auf die Kleinpressformen ergibt dies eine Höhe von rund 5 mm.

Diese beiden Ansätze für die Bestimmung der Höhe der zu untersuchenden konkaven Stempelform (5 mm und 20 mm) wurden in einer Versuchsreihe auf die Auswirkung auf die Druckfestigkeit im Vergleich zur Herstellung von Wachsprüfkörpern mit flacher Stempelform untersucht. Ziel dieses Versuchs war es, durch die konkave Stempelform die Randbereiche, bei denen die Wandreibung vorherrscht, stärker zu verdichten, um ein gleichmäßiges und homogenes Gefüge im Wachsprüfkörper zu erzielen. Dadurch sollen höhere Druckfestigkeiten der Wachsprüfkörper erzielt werden. In Abbildung 4-49 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Die Druckfestigkeitsprüfung wird mit Hilfe der in 4.2.2.1 beschriebenen Universalprüfmaschine durchgeführt.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

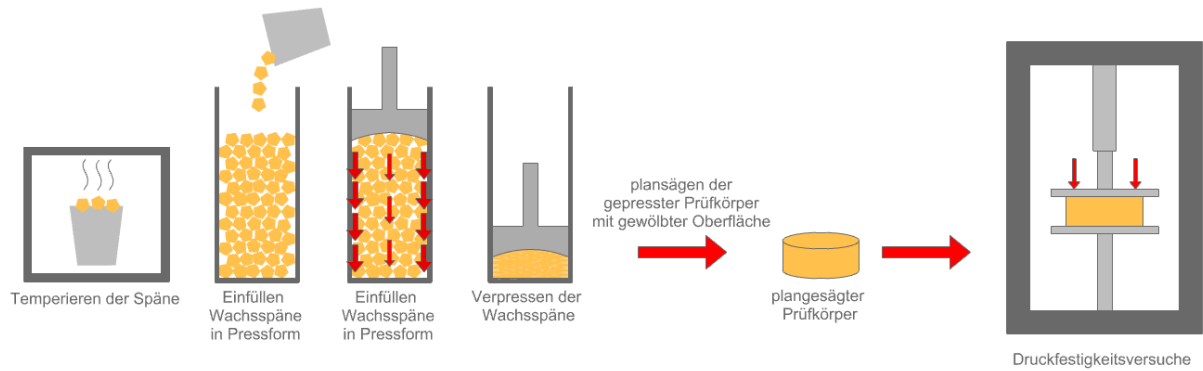


Abbildung 4-49: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Prüfkörper mit unterschiedlichen Stempelformen und Druckfestigkeitsuntersuchung der plangefrästen Prüfkörper

Für die Druckfestigkeitsuntersuchungen werden drei zylindrische Wachsprüfkörper pro Stempelform (5 mm und 20 mm Wölbung) und pro Herstellungsparameter (T20D3 und T40D5) untersucht. Da die gepressten Wachsprüfkörper durch die konkave Stempelform keine flache Oberseite aufweisen, wird die Wölbung vor dem Einsetzen des Prüfkörpers in die Prüfmaschine plangefräst, da eine flache Oberseite für die Druckfestigkeitsuntersuchungen notwendig ist. Im Anschluss werden analog zu den Versuchen in 4.2 die Wachsprüfkörper auf deren Druckfestigkeit hin untersucht. Die gemittelten Ergebnisse sind in Abbildung 4-50 dargestellt.

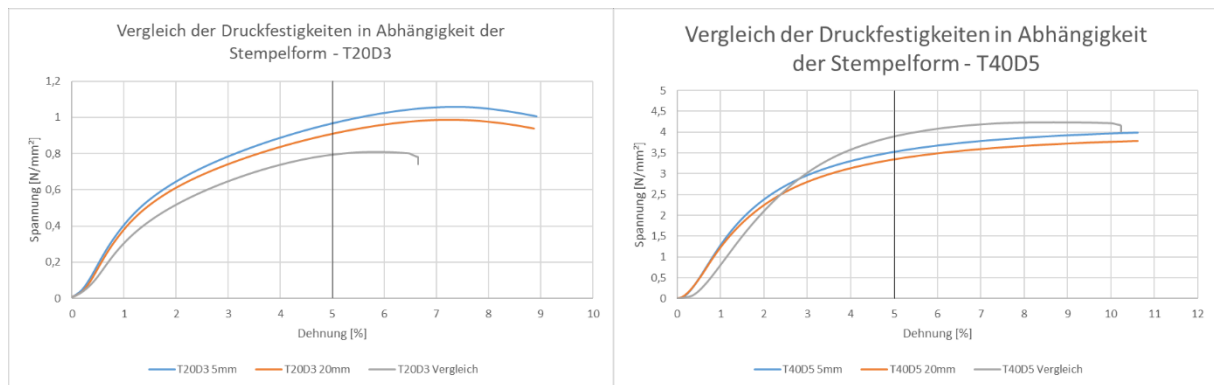


Abbildung 4-50: Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung der Prüfkörper mit unterschiedlicher Stempelform – Prüfkörper hergestellt bei T20D3; Prüfkörper hergestellt bei T40D5 (v. l. n. r.)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stempelform bei den Probekörpern, die bei 20 °C und 30 kN Presskraft hergestellt wurden, einen positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit (+15 % bei 5 % Dehnung) hat, wohingegen sich bei den Prüfkörpern, die bei 40 °C und 50 kN hergestellt wurden, die konkave Stempelform als nachteilig erweist. Der Grund dafür lässt sich darauf zurückführen, dass bei den niedrigen Temperaturen (20 °C) und moderaten Presskräften (30 kN) (Kaltverpressen vgl. [60]) die Wandreibung der Pressform einen Einfluss auf die spätere Druckfestigkeit hat, wohingegen bei der Herstellung von Prüfkörpern bei hohen Temperaturen (40 °C) und gesteigerten Presskräften (50 kN) (Warmverpressen) dieser Einfluss der Wandreibung überwunden werden kann, da sich zum einen die erwärmten Wachsspäne grundsätzlich besser verbinden und zum anderen die gesteigerte Presskraft ausreicht, um die Wandreibung zu überwinden und die Wachsspäne trotz flacher Stempelform kraftschlüssig und homogen zusammenzupressen.

Zudem zeigte sich, dass die Festigkeiten der Prüfkörper, die mit der konkaven Stempelform mit einer Höhe von 5 mm hergestellt wurden, über den Festigkeiten der Prüfkörper mit konkaver Stempelform mit einer Höhe von 20 mm liegen. Somit ist in niedrigen Temperatur- und Presskraftbereichen der Einsatz einer konkaven Stempelform mit einem Verhältnis von Höhe und Durchmesser von 0,05 als zielführend anzusehen. Bei höheren Temperaturen und gesteigerten Presskräften hat eine angepasste Stempelform keinen positiven Einfluss auf die zu erwartende Druckfestigkeit der hergestellten

Wachskörper. Da der Einfluss der angepassten Stempelform lediglich bei den Prüfkörpern T20D3 einen positiven Effekt auf die Druckfestigkeit hat und der Aufwand des Planfräsens, um prüffähige Körper zu erhalten, hoch ist, wird dieser Ansatz für zusätzliche kleinformatische Untersuchungen nicht weiterverfolgt. Jedoch wird er in den Großversuchen bei der Herstellung von Wachrohrlingen aufgrund der Stempelform der Großpresse von B+S zum Einsatz kommen.

4.2.3.8 Zusammenfassung

Die zuvor beschriebenen weiterführenden Versuche haben eine Vielzahl an unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Druckfestigkeitsentwicklung der unterschiedlich hergestellten Prüfkörper untersucht, die sich in drei verschiedene Kategorien zusammenfassen lassen:

Kein Einfluss:

- Die Form/Kubatur eines aus Wachsspänen gepressten Prüfkörpers hat keinen nennenswerten Einfluss auf die resultierende Druckfestigkeit.

Geringer Einfluss:

- Zusatzstoffe, die vor dem Pressvorgang trocken zu den Wachsspänen gemischt und im Anschluss verpresst wurden, zeigten sowohl bei den Prüfkörpern T20D3 sowie T40D5 geringere Druckfestigkeiten als Vergleichsprüfkörper ohne Zusatzstoffe. Durch den Einsatz von Zusatzstoffen zeigten diese ein elastisches, gummiartiges Verhalten, wodurch die Möglichkeit eines anderen Einsatzgebietes (Innenschalungen) gegeben ist.
- Das nachträgliche Tempern von kalt gepressten Wachsprüfkörpern hat positiven Einfluss auf die Druckfestigkeitsentwicklung der Späne, jedoch liegen die Festigkeiten der Prüfkörper, deren Späne vor dem Pressprozess erwärmt wurden, über den Festigkeiten der nachträglich getemperten Prüfkörper. Dieser Ansatz ist nur dann sinnvoll, wenn eine Erwärmung der Späne vor dem Pressprozess am Standort nicht umsetzbar ist. Das nachträgliche Tempern ist zeitintensiv. Aus diesem Grund muss eine große Stückzahl von Wachskörpern vorgehalten werden, was sich nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses auswirkt.
- Durch die Anpassung der Stempelform konnte gezeigt werden, dass diese bei den Prüfkörpern T20D3 einen lohnenden Mehrwert (Druckfestigkeitssteigerung +15 %) liefert, wohingegen die Stempelform bei T40D5 sogar negativen Einfluss auf die Druckfestigkeitsentwicklung hatte und nicht angepasst werden sollte.

Großer Einfluss:

- Die Kriechversuche haben gezeigt, dass sich die Temperatur sowie die Presskraft positiv auf die Zeitstandfestigkeit der untersuchten Wachsprüfkörper auswirken. Im Vergleich zu den Prüfkörpern T20D3 (Verformung nach 12h $f_{pl} = 7,81 \text{ mm} = 100 \%$) sank die Verformung der Prüfkörper T40D5 unter gleicher Last nach 12 h auf $f_{pl} = 1,27 \text{ mm}$ (16 %).
- Zusatzstoffe, die vor dem Pressprozess in die Späne durch Einschmelzen und Einrühren eingearbeitet wurden, zeigen eine deutliche Steigerung der Druckfestigkeit (+70 %) im Vergleich zu Prüfkörpern ohne Zusatzstoffe.
- Die Kugeleindruckversuche an den Prüfkörpern T20D3 und T40D5 haben gezeigt, dass die Steigerung der Temperatur sowie der Presskraft einen erfolgsversprechenden Einfluss auf die lokale Oberflächenfestigkeit der Wachskörper hat.

Abschließend kann festgehalten werden, dass das Einarbeiten von Zusatzstoffen in das flüssige Wachs und die daraus produzierten Späne den vielversprechendsten Ansatz für eine mögliche Weiterentwicklung des Wachses als Schalungsmaterial darstellen, da zum einen die Druckfestigkeit gesteigert werden kann (höhere Robustheit) und zum anderen die Materialkosten durch die Substitution von Wachs durch das billigere Kalksteinmehl verringert werden. Die gesteigerten Festigkeiten dieser

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Prüfkörper spiegeln sich ebenfalls in den Ergebnissen der Kriechversuche wider. Da der händische und der zeitliche Aufwand zur Herstellung dieser weiterentwickelten Späne derzeit hoch sind, wird dieser Ansatz in Zukunft nicht weiterverfolgt. Er schafft jedoch die Grundlage für weiterführende Forschungen auf diesem Gebiet.

4.3 Einfluss der Pressparameter auf die Zerspanbarkeit von ConFormWax

Für die zuvor untersuchten Festigkeiten ist eine wirtschaftliche Fräsbarkeit für einen Werkstoff, der im Schalungsbau zum Einsatz kommt, unerlässlich. Das Material muss schnell, präzise und ohne hohen Werkzeugverschleiß (hohe Standzeiten der Fräswerkzeuge) zerspannt werden können. Als Benchmark in dieser Sparte ist die Zerspanung von EPS zu nennen, das schnell und ohne erkennbaren Werkzeugverschleiß, jedoch mit Einbußen bei der Präzision bearbeitet werden kann. Um gepresste Wachskörper hinsichtlich dieser Fräseigenschaften zu untersuchen, wird in diesem Kapitel eine Vielzahl von kleinformatigen Wachsprüfkörpern mit Hilfe einer Drei-Achs-Fräse (Roland Modela MDX 40) zerspannt. Diese werden später visuell und durch optische Messtechnik miteinander verglichen. Um die Fräsergebnisse der unterschiedlichen Prüfkörper untereinander vergleichbar zu machen, wird eine Testgeometrie festgelegt, die möglichst viele Geometrieaspekte abbildet. In 4.3.1 wird genauer auf diese Testgeometrie eingegangen. In Abbildung 4-51 ist die Versuchsdurchführung schematisch dargestellt.

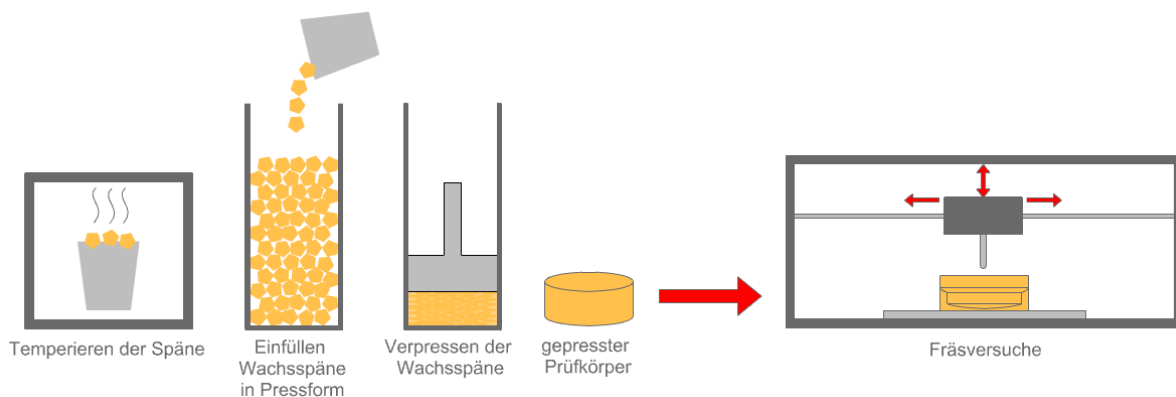


Abbildung 4-51: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Prüfkörper und der Fräsuntersuchungen der Prüfkörper

Die hier untersuchte Versuchsmatrix gleicht der Versuchsmatrix in Kapitel 4.2.2.1 mit den Herstellparametern (T10-T40 und D1-D5) ohne den Einsatz von Zusatzstoffen. Zu den Prüfkörpern ohne Zusatzstoffe werden die zwei zielführenden Herstellparameterkombinationen (T20D3 und T40D5) mit den in 4.2.3.3 aufgeführten Zusatzstoffen untersucht.

Die Probekörper sind zylindrisch, haben einen Durchmesser von 10 cm und eine Höhe von ca. 7 cm (Abbildung 4-52). Gefräst wird bei einer Raumtemperatur von 20 °C.

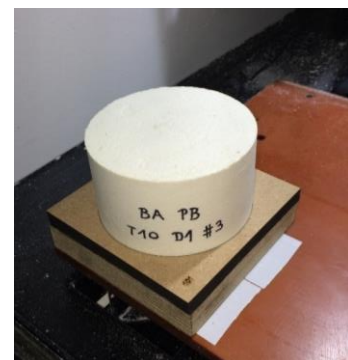


Abbildung 4-52: In die Drei-Achs-Fräse eingesetzter Wachsprüfkörper T10D1

4.3.1 Fräsgeometrie

Um die Fräsbarkeit der Wachse zu untersuchen, wird mit der Drei-Achs-Fräse *Modela MDX 40* der Marke *Roland* folgende Geometrie in Anlehnung an [9] in die Wachskörper gefräst:

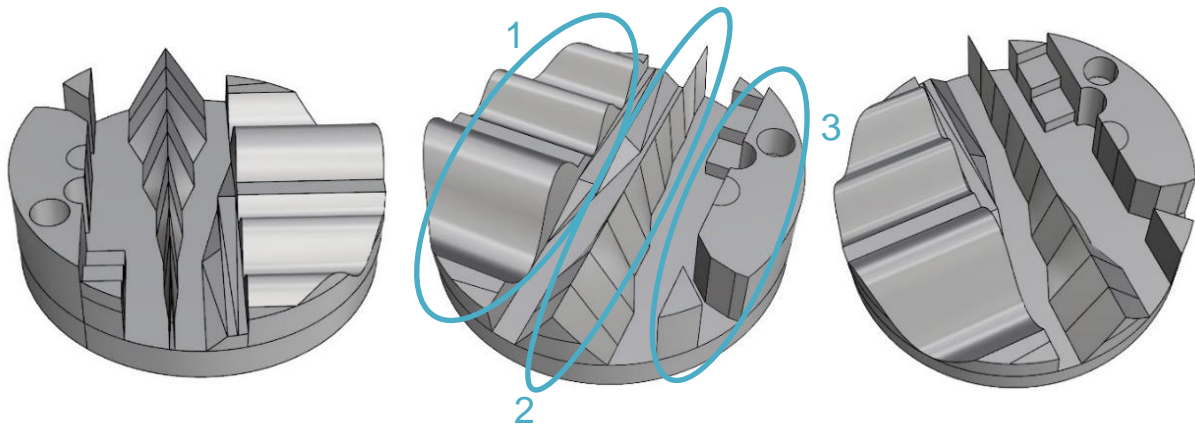


Abbildung 4-53: Theoretische Geometrie der gefrästen Wachskörper mit markierten Bereichen [9]

Die Geometrie unterteilt sich in folgende drei Bereiche:

- Im ersten Bereich (1) wird untersucht, wie gut parabelförmige Flächen in das Wachs gefräst werden können, um die Fräsbarkeit von Freiformflächen zu simulieren.
- Im zweiten Bereich (2) wird ein Grat gefräst, dessen Winkel immer kleiner wird. Begonnen wird bei einem Winkel von 60 Grad, am anderen Ende beträgt der Winkel fünf Grad. Es wird betrachtet, bis zu welchem Winkel ein Fräsen ohne Abbrüche möglich ist.
- Im dritten Bereich (3) werden unterschiedliche geometrische Formen, wie zum Beispiel ein Dreieckszylinder, ein zylindrisches Loch und Stufen gefräst. Zudem werden scharfe Kanten erstellt.

Diese Aspekte geben einen Überblick, ob ein Material zur Fräsbearbeitung geeignet ist, und zeigen, welche Geometrieaspekte mit den zuvor gewählten Herstellparametern fräsbar und herstellbar sind.

4.3.2 Fräsparameter

Um die Ergebnisse der Kleinfräsversuche später mit den Großfräsversuchen zu vergleichen, werden in Tabelle 4-6 die durch Vorversuche ermittelten Fräsparameter für den Schrapp- sowie Schlichtprozess festgelegt. Alle späteren Kleinfräsversuche wurden mit den gleichen Fräsparametern durchgeführt. Diese stellen nicht das Maximum hinsichtlich einer möglichst schnellen Bearbeitung dar, sondern sind als ein sinnvolles Mittelmaß zwischen einer möglichst hohen Präzision sowie einer möglichst schnellen Bearbeitungsgeschwindigkeit anzusehen. Die Fräsbahnplanung ist aufgrund von Einschränkungen der Steuerungssoftware der Drei-Achs-Fräse nur im Zick-Zack (vgl. Abbildung 3-13) und von oben nach unten möglich. Eine Steigerung des Zeitspanvolumens ist in Zukunft durch die Optimierung des Fräswerkzeuges sowie der Fräsbahnplanung möglich.

Tabelle 4-6: Fräsparameter zur Herstellung der Testgeometrie

Fräsparameter Kleinfräsversuche			
Fräswerkzeug	Schrapp-Prozess	Schlicht-Prozess	Einheit
	Einzahnfräser d = 6mm	Einzahnfräser d = 6mm	[-]
Frässtrategie	Zick-Zack	Zick-Zack	[-]
Schnittbreite (Zustellung) a_p	3	0,1	[mm]
Arbeitseingriff a_e	3	1	[mm]
Drehzahl n	13000	13000	[1/min]
Vorschubgeschwindigkeit v_f	30	30	[mm/sec]
Schlichtzugabe	1	0	[mm]
Bearbeitungs- dauer	15	141	[min]
Zerspantes Volumen	172,6		[cm³]
Zeitspanvolumen Q	18,44017094		[mm³/sec]

4.3.3 Ergebnisse

Um eine bessere Übersicht zu erhalten, werden die Proben mit und ohne Zusatzstoffe getrennt voneinander betrachtet. Zudem können aufgrund der großen Anzahl an Prüfkörpern nicht alle Versuchsergebnisse in Form von Bildern in diesem Kapitel abgebildet werden. Im Anhang sind alle durchgeführten Fräsversuche bildlich aufgeführt und dokumentiert.

4.3.3.1 Probekörper ohne Zusatzstoffe

Nachfolgend wird eine sinnvolle Auswahl der Probekörper aus verschiedenen Druck- und Temperaturbereichen verglichen, um den Einfluss der Temperatur sowie des Pressdrucks zu verdeutlichen.

Vergleich der Prüfkörper, die bei 10 °C und einer Presskraft von 10 kN bzw. 50 kN hergestellt wurden

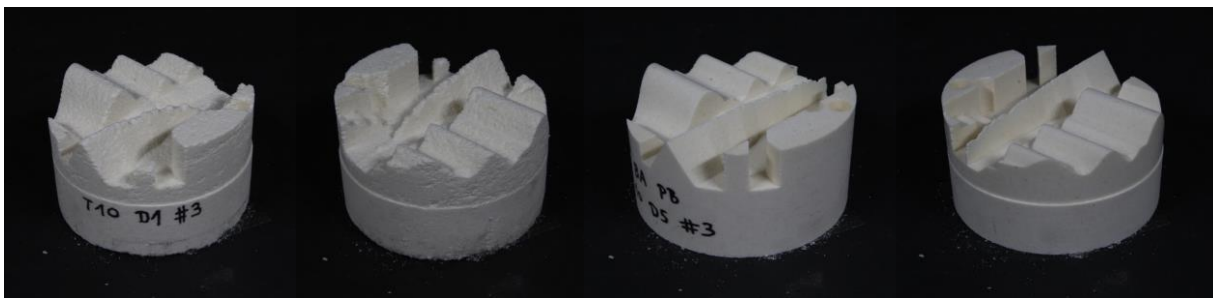


Abbildung 4-54: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper T10D1 und T10D5 (v. l. n. r.)

Durch die Steigerung der Presskraft von 10 kN auf 50 kN ist zu sehen, dass die fräsbaren und somit herstellbaren Geometrieaspekte zunehmen. Die Oberfläche ist beim Prüfkörper T10D5 geschlossen und glatt, wohingegen die Oberfläche des Prüfkörpers T10D1 offenporig und rau ist.

Vergleich der Prüfkörper, die bei 40 °C und einer Presskraft von 10 kN, 50 kN bzw. 100 kN hergestellt wurden

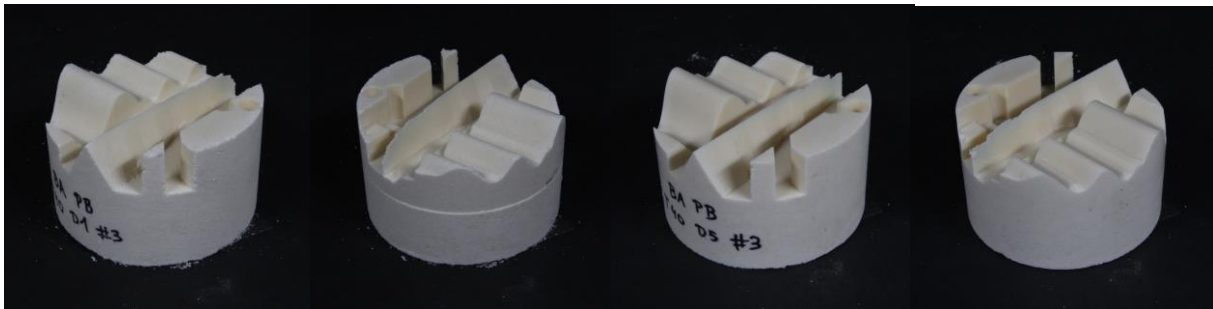


Abbildung 4-55: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper T40D1 und T40D5 (v. l. n. r.)

Dieser Fräsversuch macht deutlich, dass schon bei 10 kN Presskraft und 40 °C Herstelltemperatur das Fräsergebnis besser ausfällt als bei den Prüfkörpern T10D1. Alle Geometrieaspekte konnten hergestellt werden. Lediglich die vorderste Ecke des fünf Grad steilen Keils ist abgebrochen. Die Oberfläche ist geschlossen und glatt. Somit bekräftigt dieser Versuch die Tatsache, dass die Temperatur einen größeren Einfluss auf die Druckfestigkeit der Prüfkörper hat als die Presskraft. Durch eine Steigerung der Presskraft auf 50 kN kann das Fräsergebnis hinsichtlich der Präzision, speziell die Kantenausbildung betreffend, weiter gesteigert werden.

Durch eine Steigerung der Presskraft auf 100 kN kann das Fräsergebnis (Abbildung 4-56) verglichen mit Abbildung 4-55 (rechts) nicht gesteigert werden. Auch dieser Umstand wurde bei den Untersuchungen der Druckfestigkeit deutlich.

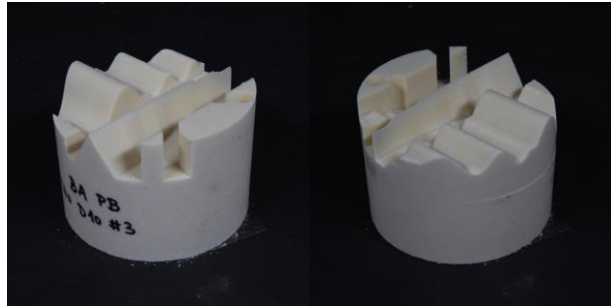


Abbildung 4-56: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper T40D10 (v. l. n. r.)

4.3.3.2 Probekörper mit Zusatzstoffen

Prüfkörper mit Baumwolle als Zusatzstoff

Es wurde jeweils ein Probekörper mit 20 % Baumwollzusatz bei 20 °C und 30 kN (T20 D3 BW20) sowie bei 40 °C und 55 kN (T40 D5,5 BW20) hergestellt. Wie auf den folgenden Bildern zu erkennen ist, ließen sich die Probekörper mit Baumwolle schlecht fräsen. Sogar bei einer Herstellungsdruckkraft von 55 kN und einer Temperatur von 40°C kam es zu starken Abplatzungen. Es ist erkennbar, dass die Baumwolle kleine Klumpen im Wachs bildet, welche beim Fräsen abreißt. Es wird festgehalten, dass sich Wachs mit Baumwolle als Zusatzstoff nicht für den Gebrauch als Schalungsmaterial eignen.



Abbildung 4-57: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper mit 20 % Baumwolle T20D4 und T40D5,5 (v. l. n. r.)

Prüfkörper mit Cellulose als Zusatzstoff

Es wurde jeweils ein Probekörper mit 20 % Cellulosezusatz bei 20 °C und 30 kN (T20D3 C20) sowie bei 40°C und 55 kN (T40D5,5 C20) hergestellt. Die nachfolgenden Bilder zeigen, dass bei den Wachskörpern bei 20 °C und 30 kN deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt wurden als bei den Proben im gleichen Druck- und Temperaturbereich ohne Zusatzstoffe. Die Oberfläche ist rau und es gibt in mehreren Bereichen Abplatzungen. Die Probe, die bei 40 °C und 55 kN hergestellt wurde (T40D5,5 C20), weist hingegen bessere Fräsergebnisse auf. Die Oberfläche ist glatt und Abbrüche sind kaum vorhanden. Zudem sorgt die Cellulose dafür, dass das Wachs nicht verklebt. Proben mit anderen Massenanteilen an Cellulose wurden aus Zeitgründen nicht untersucht. Allerdings kann festgehalten werden, dass Wachskörper mit Cellulose in hohen Druck- und Temperaturbereichen hinsichtlich ihrer Fräsbarkeit und des erzielten Fräsergebnisses als Schalungselemente verwendet werden können.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

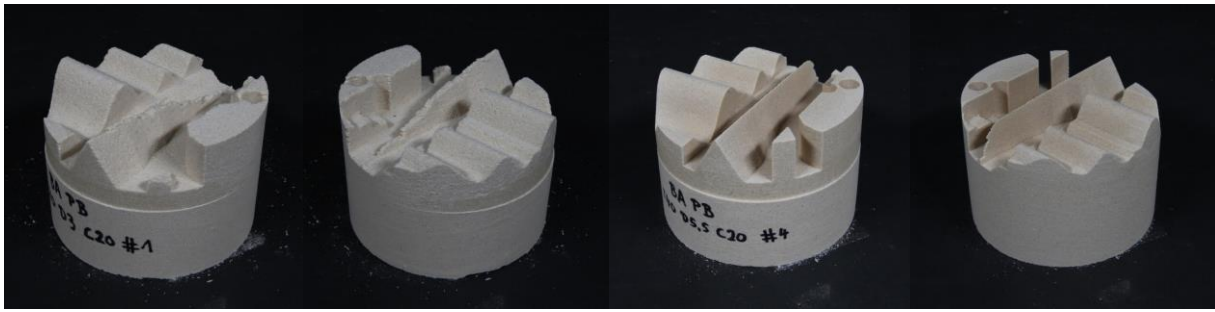


Abbildung 4-58: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper mit 20 % Cellulose T20D4 und T40D5,5 (v. l. n. r.)

4.3.3.3 Optische Vermessung von gefrästen Wachsprüfkörpern

Um die Präzision der gefrästen Prüfkörper zu messen, wurden drei einer optischen 3D-Messtechnik unterzogen und im Anschluss mit dem digitalen Modell verglichen. In Abbildung 4-59 sind die drei unterschiedlichen Prüfkörper sowie das optische Messverfahren dargestellt.



Abbildung 4-59: Darstellung der drei untersuchten Prüfkörper – Prüfkörper T40D5; Prüfkörper T40D5 mit 20 % Cellulose; Prüfkörper aus gegossenem Wachs; Darstellung des optischen Messverfahrens (v. l. n. r.)

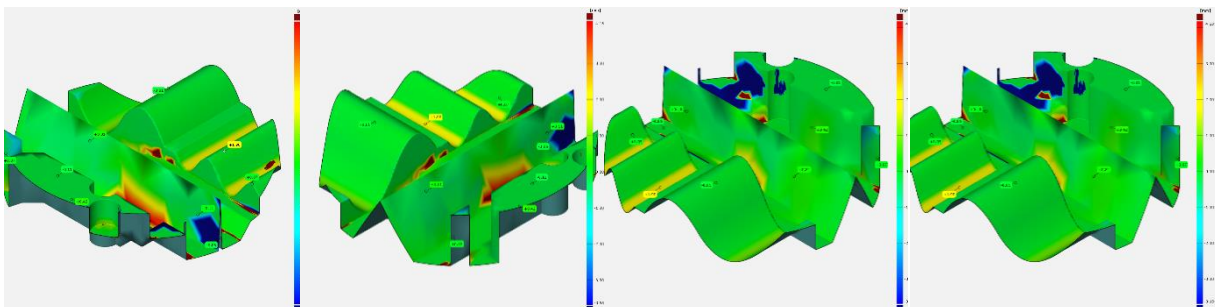


Abbildung 4-60: Vergleich des Ergebnisses des optischen Messverfahrens mit dem digitalen Modell, Prüfkörper T40D5

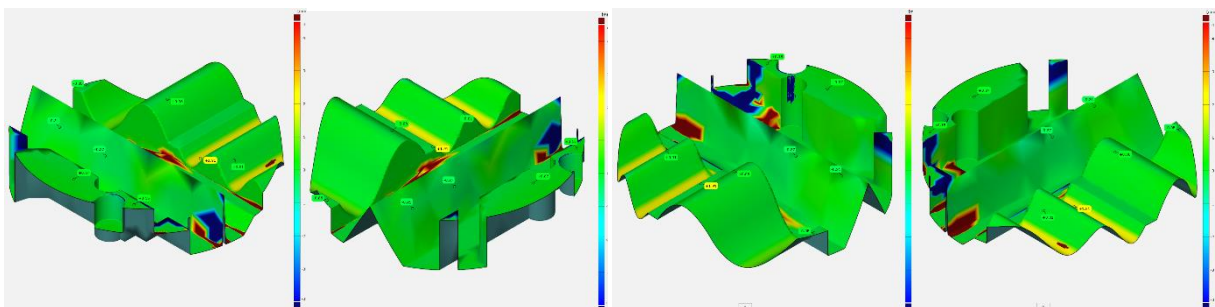


Abbildung 4-61: Vergleich des Ergebnisses des optischen Messverfahrens mit dem digitalen Modell, Prüfkörper T40D5 mit 20 % Cellulose

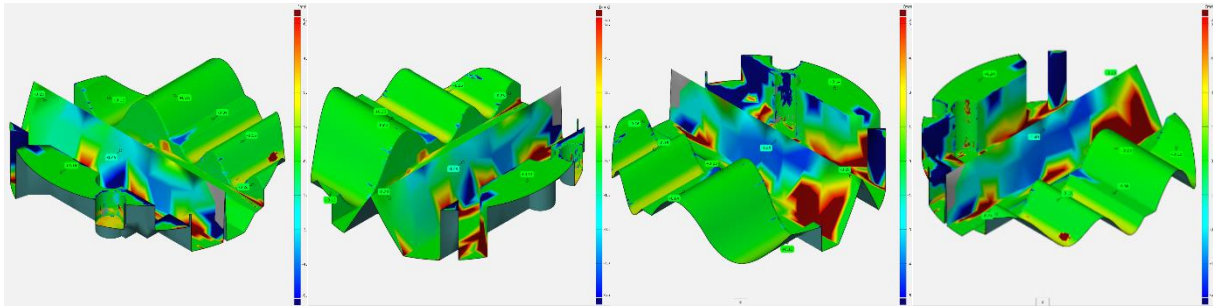


Abbildung 4-62: Vergleich des Ergebnisses des optischen Messverfahrens mit dem digitalen Modell, Prüfkörper aus gegossenem Wachs

Abbildung 4-60, Abbildung 4-61 und Abbildung 4-62 zeigen, dass in allen Bereichen der herzustellenden Testgeometrie hohe Genauigkeiten im Zehntel-Millimeter-Bereich erreicht wurden. Die dunkelblauen und dunkelroten Bereiche stellen keine Ungenauigkeiten dar, sondern lassen sich auf *Scanschatten* zurückführen. Diese Irregularität tritt speziell beim Vermessen von komplexen Geometrien auf, da nur unter großem Aufwand der gesamte Geometriebereich optisch erfasst werden kann.

Das Versuchsergebnis spiegelt die Tatsache wider, dass kein Unterschied zwischen den drei Prüfkörpern erkennbar ist. Alle drei gefrästen Prüfkörper erreichen eine hohe Präzision. Es kann festgehalten werden, dass gepresstes Wachs hinsichtlich der zu erreichenden Präzision keinen Nachteil gegenüber gegossenem Wachs aufweist.

4.3.3.4 Werkzeugverschleiß bei der Zerspangung von Wachs mit Zusatzstoffen

In [9] wurden die Auswirkungen auf die Fräswerkzeuge bei längeren Einsatzzeiten (Standzeiten) untersucht. In Blöcke gegossenes Wachs wurde mit unterschiedlichen Fräswerkzeugen über eine gewisse Distanz hinweg zerspant, um den Verschleiß am Fräswerkzeug über die Standzeit zu untersuchen. Die Fräswerkzeuge wurden im Anschluss mit Hilfe eines Mikroskops auf deren Verschleiß hin geprüft. Das Ergebnis dieser Untersuchung war, dass sich bei der Zerspangung von in Blöcke gegossenem Wachs ohne Zusatzstoffe keine sichtbaren Verschleißerscheinungen an den Fräswerkzeugen feststellen lassen. Es ist somit davon auszugehen, dass Wachskörper, die zuvor durch einen Pressprozess aus Wachsspänen erzeugt wurden, ebenfalls keine Verschleißerscheinungen an den Fräswerkzeugen zur Folge haben.

Im Gegensatz dazu stellt ein Zusatzstoff im Wachs eine gewisse Inhomogenität des zu zerspanenden Stoffes dar. Wurde zuvor nur ein Material (reines Wachs) zerspant, kann nicht abgeschätzt werden, ob der Zusatzstoff negativen Einfluss auf die Standzeiten der Fräswerkzeuge hat. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt untersucht, welchen Einfluss Kalksteinmehl hat. Kalksteinmehl ist fein gemahlener Kalkstein und stellt im Vergleich zu den anderen Zusatzstoffen die größte Herausforderung hinsichtlich einer wirtschaftlichen, schnellen und schonenden Zerspangung dar.

Um die Wachsspäne für den Versuch in Kapitel 4.2.3.4 herzustellen, wurden in flüssiges Wachs 50 Vol.-% Kalksteinmehl eingerührt. Das Wachs-Kalkstein-Gemisch wurde in eine Abkühlform gegossen. Nach dem Abkühlprozess wurde der Wachs-Kalksteinblock in die Drei-Achs-Fräse gestellt und im Schrubb-Prozess (Tabelle 4-6 Schrubb-Prozess) vollständig zerspant. Dieser Zerspangungsprozess wurde mit einem neuen Fräswerkzeug (Ein-Zahn-Fräswerkzeug, $d=6\text{mm}$) vollständig und ohne Unterbrechungen durchgeführt. Vor Beginn des Fräsprozesses wurde das neue Fräswerkzeug mit Hilfe eines Mikroskops untersucht und dokumentiert. Die Länge der gesamten Bahnplanung betrug 1135 m. In Abbildung 4-63 ist das Fräswerkzeug vor dem Fräsprozess und in Abbildung 4-64 nach dem Fräsprozess in drei verschiedenen Vergrößerungen dargestellt.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

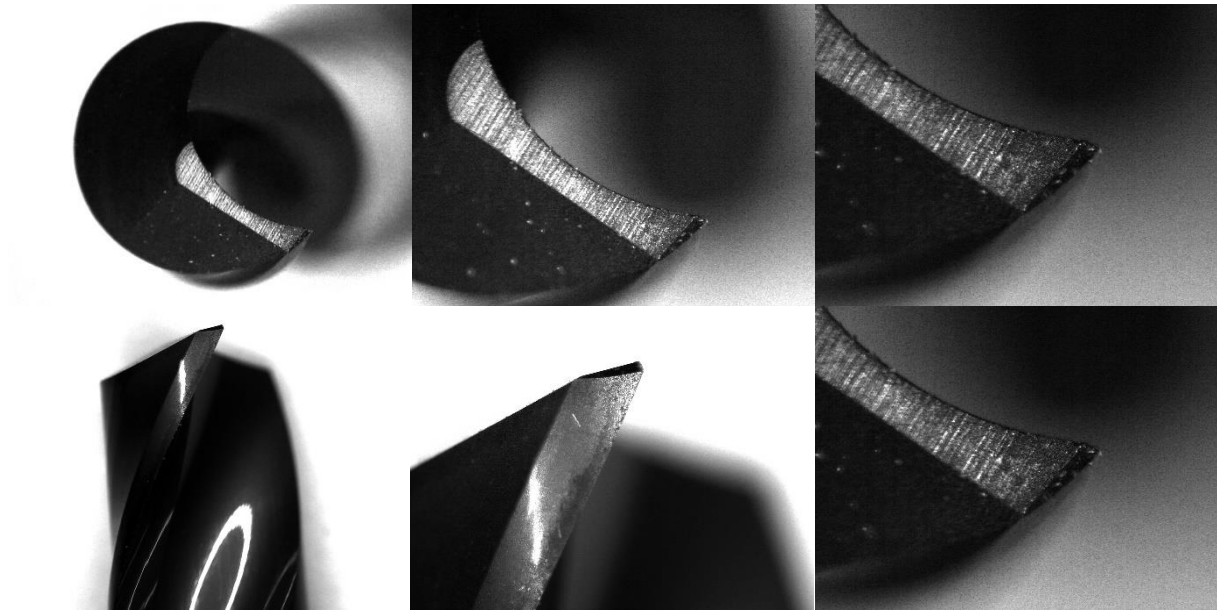


Abbildung 4-63: Mikroskopaufnahmen des neuen Ein-Zahn-Fräswerkzeuges, Draufsicht (obere Bildhälfte), Ansicht (untere Bildhälfte), Vergrößerungsgrad 8-fach, 25-fach, 40-fach (v. l. n. r.)

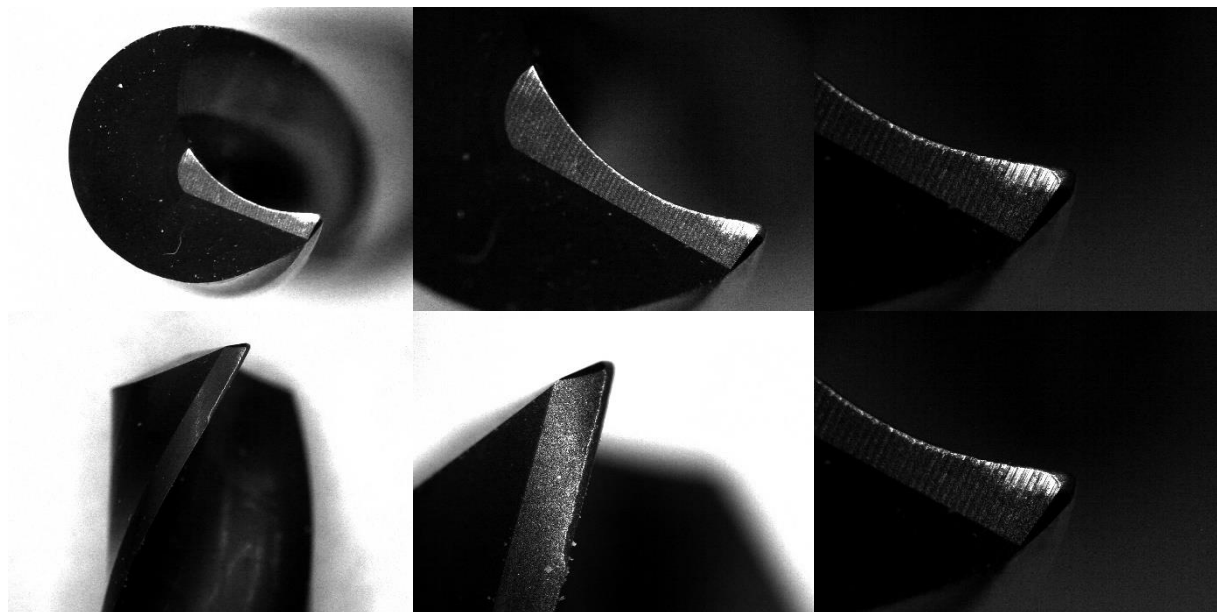


Abbildung 4-64: Mikroskopaufnahmen des gebrauchten Ein-Zahn-Fräswerkzeuges, Draufsicht (obere Bildhälfte), Ansicht (untere Bildhälfte), Vergrößerungsgrad 8-fach, 25-fach, 40-fach (v. l. n. r.)

Der Vergleich von Abbildung 4-63 mit Abbildung 4-64 zeigt, dass speziell an der Spitze des Fräswerkzeuges Abnutzungserscheinungen erkennbar sind. Während des gesamten Fräsprozesses wirkte sich dieser nur unter dem Mikroskop erkennbare Verschleiß des Fräswerkzeuges in keiner Weise nachteilig aus. Haptisch konnte das Fräswerkzeug nach Abschluss des Prozesses immer noch als spitz und scharf betrachtet werden.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass trotz der Fräsbahnlänge von über einem Kilometer mit einem derart kleinen Fräswerkzeug nur geringe Verschleißerscheinungen visuell erkennbar waren. Der Zusatzstoff Kalksteinmehl im Wachs stellt für einen wirtschaftlichen, schnellen und schonenden Fräsprozess somit kein Hindernis dar.

4.3.4 Zusammenfassung

Die zuvor durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sowohl die Temperatur als auch die Presskraft mit einhergehender Steigerung der Festigkeit einen positiven Einfluss auf die Zerspanbarkeit haben. Die Herstellparameter (Herstelltemperaturen von 40 °C und Presskräfte von 50kN) stellen, wie schon in Kapitel 4.2.2 erläutert, das Optimum für eine wirtschaftliche, präzise und schnelle Bearbeitung dar. Zudem kann festgehalten werden, dass auch andere Kombinationen von Herstellparametern für einen automatisierten Prozess zielführend sind, sollten sich die Anforderungen an das Material und die Maßhaltigkeit ändern.

Weiter konnten die Versuche in diesem Kapitel zeigen, dass sich der Einsatz von Zusatzstoffen – abgesehen von Baumwolle – nicht nachteilig auf die Präzision der herzustellenden Geometrie sowie auf die Wirtschaftlichkeit hinsichtlich des Fräswerkzeugverschleißes auswirkt.

4.4 Geeignete Verbindungsmittel in ConFormWax

Um gepresstes Wachs als Schalungsmaterial einsetzen zu können, ist es neben der Gewährleistung einer ausreichenden Druckfestigkeit und guter Fräseigenschaften notwendig, das Wachs als Schalung auf Schalungsträgern oder mit anderen Systemschalungen kombinieren zu können. Hierzu muss eine Verbindungstechnik entwickelt werden, um gepresste Wachskörper kraftschlüssig miteinander sowie mit anderen Materialien wie Holz und Stahl zu verbinden. In [9] wurden einige Voruntersuchungen zu diesem Thema durchgeführt, jedoch wurden bei diesen Versuchen Wachskörper aus gegossenem, flüssigem Wachs untersucht. Ergebnis dieser Vorversuche war, dass sich generell Verbindungstechnik und -mittel aus dem Holzbau eignen.

Die gleichen Verbindungsmittel wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht und durch geeignete zusätzliche Verbindungsmittel ergänzt. Abbildung 4-65 zeigt alle Verbindungsmittel, die im Rahmen dieser Versuchsreihe auf deren Tragfähigkeit untersucht wurden.

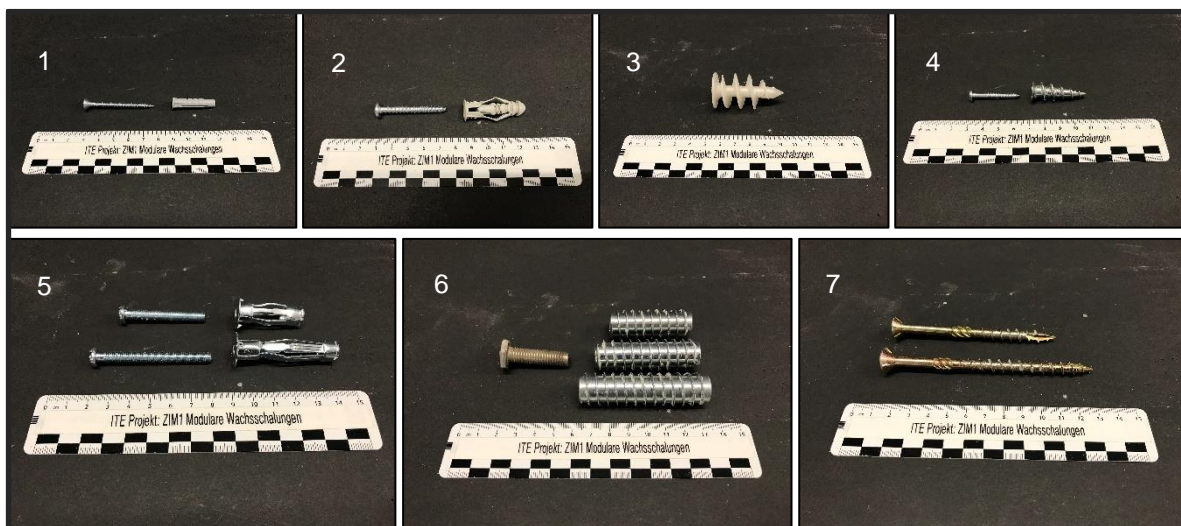


Abbildung 4-65: Darstellung der in diesem Kapitel untersuchten unterschiedlichen Verbindungsmittel

- | | |
|----------------------------|---|
| 1. Universaldübel: | $\varnothing =$ 6 mm l=30 mm und 50 mm |
| 2. Spreizdübel Kunststoff: | $\varnothing =$ 10 mm l=39 mm |
| 3. Dämmstoffdübel: | $\varnothing_{\text{innen}} =$ 15 mm l=50 mm |
| 4. Gipskartondübel: | $\varnothing_{\text{innen}} =$ 7 mm l=37,5 mm |
| 5. Spreizdübel Metall: | $\varnothing =$ 10,5 mm l=37 mm und 52 mm |
| 6. Rampa-Muffen: | $\varnothing_{\text{innen}} =$ 15 mm l=50 mm, 60 mm und 70 mm |
| 7. Holzbauschrauben: | $\varnothing_{\text{innen}} =$ 5,5 mm l=50 mm und 80 mm |

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

4.4.1 Nachträgliches Eindrehen von Verbindungsmitteln

Wachs im Allgemeinen und das gepresste Wachs im Besonderen ist als Material spröde und besitzt geringe Zugfestigkeit. Aus diesem Grund können Schrauben und andere Verbindungsmittel nicht wie beispielsweise bei Holz direkt in das Wachs eingedreht werden, da sonst die Wachsprobe aufreißt und unbrauchbar wird. Daher werden Löcher mit dem in Abbildung 4-65 angegebenen Durchmesser und der entsprechenden Länge (Dübel-, Gewindelänge) mit Standardholzbohrern im Wachs vorgebohrt. Anschließend wird das jeweilige Verbindungsmittel in das vorgebohrte Loch eingedreht (Abbildung 4-65 – 3, 4, 6, 7) oder eingedrückt (Abbildung 4-65 – 1, 2, 5, 6). Abbildung 4-66 – erstes von links – zeigt als Beispiel das in den gepressten Wachsprüfkörper eingedrehte Verbindungsmittel Nr.7 (Holzbauschraube).



Abbildung 4-66: Wachsprüfkörper mit eingedrehter Holzbauschraube, Darstellung des Versuchsaufbaus, ausgerissene Schraube nach der Versuchsdurchführung, zerstörter Wachsprüfkörper nach der Versuchsdurchführung (v. l. n. r.)

In Abbildung 4-66 – zweites von links – wird der Versuchsaufbau gezeigt. Die Versuche wurden bei Wachsprüfkörpern durchgeführt, die bei 20 °C und mit einer Presskraft von 35 kN hergestellt wurden (T20D3,5). Der Wachsprüfkörper, in den das Verbindungsmittel zuvor eingebracht wurde, wurde zwischen einen hydraulisch betriebenen Motorhebekran gespannt. Mit einer Kettenkonstruktion sowie einer Kranwaage (Toleranz +/-200 g) wurde das Verbindungsmittel auf Zug belastet und so aus dem Wachs gezogen. Die maximale Auszugskraft wurde gemessen und dokumentiert. In Abbildung 4-66 – erstes und zweites von rechts – ist am Beispiel des Verbindungsmittels Nr.7 (Holzbauschraube) das Ergebnis des Auszugsversuchs dargestellt. Das gepresste Wachs versagt im unteren Bereich der Schraube in Folge von Schubversagen und im oberen Teil in Folge von Zugversagen.

Durch die unterschiedlichen Größen und die Kubatur der einzelnen Verbindungsmittel ist ein reiner Vergleich der Auszugskräfte nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wurde versucht, die Auszugskräfte zu normieren, indem die Auszugskraft durch das Produkt aus Länge und Durchmesser der einzelnen Verbindungsmittel geteilt wurde. Das daraus resultierende Verhältnis zeigt die normierte Leistungsfähigkeit der einzelnen Verbindungsmittel. Die Auszugsversuche wurden zweimal durchgeführt und die einzelnen Ergebnisse gemittelt. Die maximalen Auszugskräfte sowie das Verhältnis $\frac{F_Z}{L \times \varnothing}$ der einzelnen Verbindungsmittel ist in Abbildung 4-67 dargestellt.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

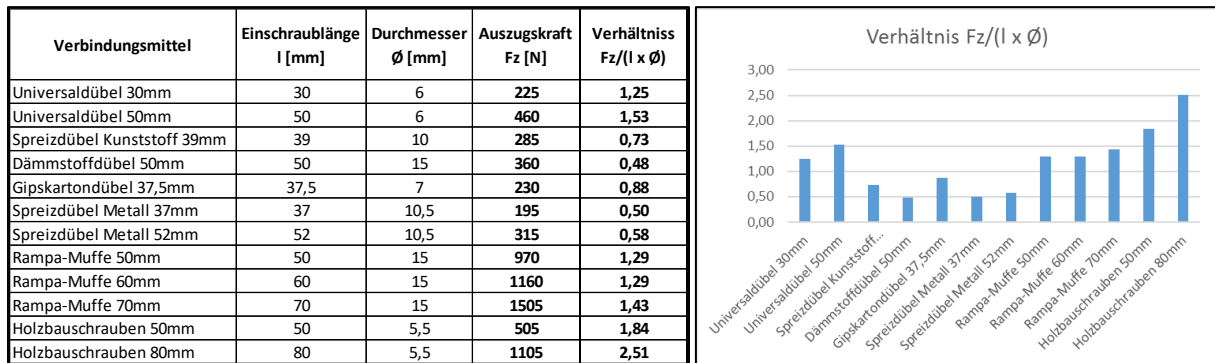


Abbildung 4-67: Richtwert für die Auszugskraft (gemittelt) sowie das Verhältnis der einzelnen Verbindungsmittel; Diagramm der normierten Verhältnisse der einzelnen Verbindungsmittel (v. l. n. r.)

Dieses nachträgliche Einbringen der jeweiligen Verbindungsmittel hat gezeigt, dass drei Typen von Verbindungsmittel in Bezug auf die Befestigung im gepressten Wachs zweckmäßig sind. Die Universaldübel, die Rampa-Muffen sowie die Holzbauschrauben besitzen ein Verhältnis $\frac{F_z}{L \times \varnothing} > 1,0$ und können somit in Bezug auf ihre Kontaktfläche mit dem gepressten Wachs am meisten Kraft übertragen. Da ein Universaldübel kein selbstständiges Befestigungsmittel ist und in diesen eine Holzbauschraube hineingedreht werden muss, um etwas kraftschlüssig mit dem Wachs zu verbinden, werden diese Verbindungsmittel in Zukunft nicht weiter untersucht. Die Versuche haben gezeigt, dass Holzbauschrauben, die direkt in das Wachs gedreht wurden, ein ähnliches Verhältnis $\frac{F_z}{L \times \varnothing}$ aufweisen. Rampa-Muffen besitzen auf der Außenseite ein grobes Gewinde für den Einsatz im Holzbau. Im Inneren verfügen sie jedoch über ein metrisches Innengewinde. Mit Hilfe dieser Verbindungsmittel ist es in Zukunft möglich, Systemschalungen, die Verbindungsmittel besitzen, die auf metrischen Gewinden basieren, kraftschlüssig miteinander zu verbinden. Alle anderen zu verbindenden Materialien können mit Holzbauschrauben kraftschlüssig befestigt werden. Aus diesem Grund werden im Projekt in Zukunft Rampa-Muffen und Holzbauschrauben weiter untersucht.

4.4.2 Umpressen von Verbindungsmitteln

Das nachträgliche Eindrehen von Verbindungsmitteln hat den Nachteil, dass ein zusätzlicher Arbeitsschritt (Vorborenen) notwendig ist, um die Verbindungsmittel in den gepressten Wachsprüfkörper eindrehen zu können. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt untersucht, ob es möglich ist, die Wachsspäne direkt um Rampa-Muffen herum aufzupressen und so den Arbeitsschritt des Vorborens zu überspringen. Die Rampa-Muffen befanden sich beim Pressvorgang schon vor dem Aufpressen des Wachses (T20D3,5) in der Pressform und wurden am Boden der Pressform fixiert, sodass sie beim Pressvorgang direkt im Wachs positioniert werden können.

Für diesen Versuch wurde der gleiche Versuchsaufbau gewählt wie bei den Auszugsversuchen zuvor (Abbildung 4-66 zweites von links). Es wurden drei verschiedene Rampa-Muffen-Innendurchmesser (M8mm, M10mm, M12mm) mehrfach getestet. In Abbildung 4-69 sind die Ergebnisse zu dieser Versuchsreihe dargestellt.



Abbildung 4-68: Prüfkörper mit rausgezogener Rampa-Muffe, die vor dem Pressprozess in der Pressform fixiert und mit Wachsspänen umpressen wurde

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

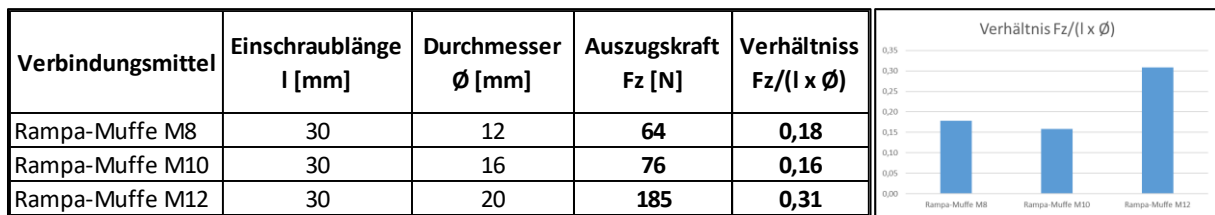


Abbildung 4-69: Richtwert für die Auszugskraft für umpresste Rampa-Muffen (gemittelt); Diagramm der normierten Verhältnisse der jeweiligen Rampa-Muffe (v. l. n. r.)

Dieser Versuch hat gezeigt, dass das *Umpressen* von Rampa-Muffen mit Wachsspänen möglich ist, jedoch sind die Auszugskräfte geringer als bei nachträglich eingeschraubten Verbindungsmitteln. Im Vergleich liegt das Verhältnis bei einer nachträglich eingeschraubten Rampa-Muffe M10 zwischen 1,29 und 1,43, wohingegen bei einer *umpressten* Rampa-Muffe M10 das Verhältnis nur bei 0,16 liegt (Abbildung 4-69). Dieser Unterschied von rund 88 % macht deutlich, dass eine nachträgliche Einbringung eines Verbindungsmittels höhere Zugfestigkeiten liefert als das Umpressen von Verbindungsmitteln. Die Rampa-Muffe, die sich während des Pressvorgangs in der Pressform befindet, stört das lokale Gefüge der gepressten Wachsspäne. Diese Störung hat zur Folge, dass die Auszugskräfte geringer sind als bei nachträglich in ein homogenes Gefüge gedrehten Verbindungsmitteln. Für das Ziel, gepresste Wachsböcke kraftschlüssig mit der SVE verbinden zu können, wird das nachträgliche Einschrauben von Holzbauschrauben und Rampa-Muffen als zielführend angesehen und weiterverfolgt.

4.4.3 Verbindungen in Wachsprüfkörper (Herstellparameter: 40 °C und 50 kN)

Wie in 4.2.2 beschrieben, besitzen Wachsrohlinge, die bei 40 °C und Presskräften von 6,37 N/mm² hergestellt wurden, höhere Festigkeiten als Wachsrohlinge, die bei 20 °C und 4,46 N/mm² hergestellt wurden. In den vorhergehenden Kapiteln 4.4.1 und 4.4.2 wurden lediglich Auszugsversuche an Wachsprüfkörpern T20D3,5 durchgeführt.

In diesem Kapitel wird untersucht, ob die erhöhte Festigkeit der Wachsrohlinge einen Einfluss auf die Auszugskräfte der zuvor getesteten Verbindungsmittel hat. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden Versuche mit Wachsprüfkörpern T40D5 in Verbindung mit Holzbauschrauben und Rampa-Muffen analog zu den Versuchen in 4.4.1 und 4.4.2 durchgeführt.

Tabelle 4-7: Richtwerte der Auszugsfestigkeiten verschiedener Verbindungsmittel an Prüfkörpern T40D5

Verbindungsmittel	Einschraublänge l [mm]	Durchmesser Ø [mm]	Auszugskraft Fz [N]	Verhältniss Fz/(l x Ø)	Verhältniss Fz/(l x Ø) gemittelt
Rampa M10	70	15	5700	5,43	5,24
Rampa M10	70	15	5300	5,05	
Holzbauschraube	80	5,5	3540	8,05	7,49
Holzbauschraube	80	5,5	3050	6,93	

Die Ergebnisse in Tabelle 4-7 zeigen, dass die Auszugskräfte für Rohlinge, die bei einer Temperatur von 40 °C gepresst wurden, höher sind. Die Auszugskraft konnte im Vergleich zu Wachsprüfkörpern T20D3,5 gesteigert werden. Dieses Resultat bestätigt die Annahme, dass die erwärmten Wachsspäne während des Pressprozesses ein stärkeres und homogeneres Gefüge ausbilden können, das nach dem Abkühlen zu höheren Festigkeiten führt.

4.4.4 Warme Verbindungsmittel eindrehen ohne Vorbohren

Wachs wird bei Temperaturen über 60 °C flüssig. Da diese Eigenschaft im Vergleich mit anderen Schalungsmaterialien einzigartig ist, wurde in dieser Versuchsreihe untersucht, ob es möglich ist, eine warme Holzbauschraube in das Wachs einzuschrauben, ohne den Wachsprüfkörper vorzubohren. Dies würde einen Arbeitsschritt einsparen.

Diese Versuchsreihe wurde analog zu der in 4.4.1 beschriebenen Versuchsreihe durchgeführt. Vor dem Einbringen der Schraube wurde diese mit Hilfe eines Bunsenbrenners gleichmäßig auf 100 °C erwärmt. Die Temperatur wurde mit einem Lasermessgerät kontinuierlich überprüft. Die erwärmte Holzbauschraube wurde in Wachsprüfkörper T20D3,5 und T40D5 eingedreht. Dabei war zu beobachten, dass sich an der Oberfläche des Wachskörpers eine kreisförmige Menge geschmolzenen Wachses anhäufte (Abbildung 4-70). Bedingt durch die Volumendehnung des Wachses von ca. 12 % dehnte sich das Wachs, das direkt mit der erwärmten Schraube in Kontakt kam, nach oben aus.



Abbildung 4-70: Wachsrohling, in den eine auf 100 °C erwärmte Schraube eingedreht wurde, mit geschmolzenem Wachs an der Oberfläche; Ausbruchsbild nach Auszugsversuch; Zerstörter Wachsrohling und Schraube mit Anhaftungen (v. l. n. r.)

Die Wachsprüfkörper wurde nach einer gewissen Abkühlzeit in den Versuchsaufbau eingesetzt und die Holzbauschraube konnte herausgezogen werden. Die Ergebnisse (Tabelle 4-8) zeigen, dass bei den Wachsprüfkörpern T40D5 die normierte Auszugsfestigkeit durch den Einsatz erwärmter Schrauben im Vergleich zum Vorbohren und Eindrehen kalter Schrauben keine Verbesserung erfuhr. Der Vergleich der Ergebnisse der Richtwerte für die Auszugsfestigkeit bei Prüfkörper T20D3,5 zeigt, dass die Auszugsfestigkeit um ca. 57 % gesteigert werden kann, wenn erwärmte Schrauben ohne Vorbohren in das Wachs eingedreht werden.

Tabelle 4-8: Vergleich der Richtwerte der Auszugsfestigkeiten von Holzbauschrauben an Prüfkörpern T40D5 und T20D3,5 mit Vorbohrung und warmer Schraube

Verbindungsmittel	Prüfkörper	Einschraublänge l [mm]	Durchmesser Ø [mm]	Auszugskraft Fz [N]	Verhältniss Fz/(l x Ø)	Vergleich
Holzbauschraube	T20D3,5 - vorgebohrt	80	5,5	1105	2,51	
Holzbauschraube	T20D3,5 - warme Schraube	80	5,5	1740	3,95	157,47%
Holzbauschraube	T40D5 - vorgebohrt	80	5,5	3295	7,49	
Holzbauschraube	T40D5 - warme Schraube	80	5,5	3170	7,20	96,21%

Diese Steigerung der Auszugsfestigkeit kann darauf zurückgeführt werden, dass sich durch das Schmelzen des Wachses im Bereich der warmen Schraube ein Pfropfen aus flüssigem Wachs um die Schraube bildet, der beim Abkühlen fester als das umgebende Material wird und die Schraube beim Herausziehen stärker behindert.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Der Einsatz von erhitzten Verbindungsmitteln kann also einen Vorteil liefern, um die Kraftaufnahme speziell bei Prüfkörpern mit geringen Temperaturen und bei Presskörpern zu steigern, und bietet Potentiale für weiterführende Untersuchungen.

4.4.5 Vergleich der Auszugsfestigkeiten von Wachsprüfkörpern und großformatigen Wachsrohlingen

Die zuvor beschriebenen Untersuchungen wurden alle an kleinformatischen Prüfkörpern mit unterschiedlichen Herstellparametern durchgeführt. Da die kleinformatischen Prüfkörper in ihrer Höhe begrenzt sind, konnte in den Versuchen zuvor keine Aussage über den Einfluss der Einschraublänge getroffen werden. Um im nächsten Schritt zu überprüfen, ob zum einen die Einschraublänge der Schrauben einen Einfluss auf die Auszugsfestigkeit hat und zum anderen die Versuchsergebnisse auf großformatige Wachsrohlinge (Maßstab 1:1) übertragen werden können, wurde ein Wachsrohling mit Hilfe der Großpresse hergestellt (T20D3,5). An diesem Wachsrohling wurden Auszugsversuche mit verschiedenen Verbindungsmitteln durchgeführt. In Abbildung 4-71 sind die untersuchten Verbindungsmittel dargestellt.

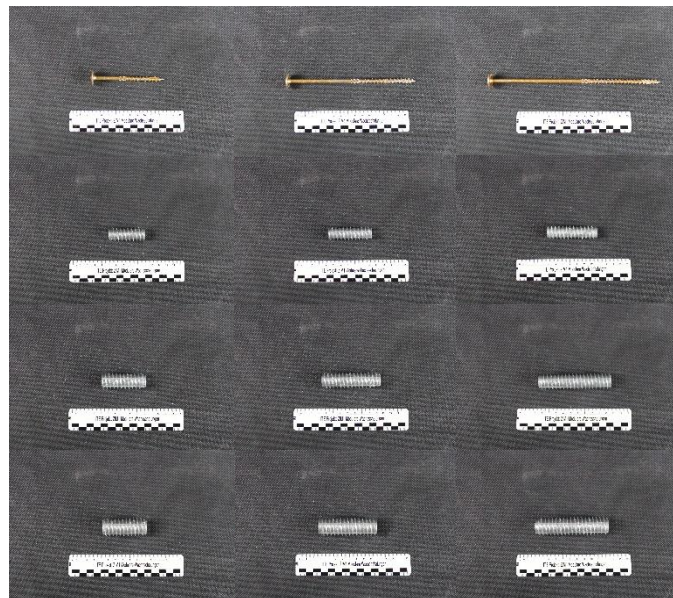


Abbildung 4-71: Holzbauschraube l=50, Holzbauschraube l=80, Holzbauschraube l=100, Rampa-Muffe M10 l=50, Rampa-Muffe M10 l=60, Rampa-Muffe M10 l=70, Rampa-Muffe M12 l=60, Rampa-Muffe M12 l=80, Rampa-Muffe M12 l=100, Rampa-Muffe M16 l=60, Rampa-Muffe M16 l=90, Rampa-Muffe M16 l=100 (v. l. n. r. und o. n. u.)

Mittels einer Schablone wurden Punkte an der Oberseite des Wachsrohlings markiert, um die Bohrungen für die durchzuführenden Auszugsversuche auf ein gleichmäßig großes Feld zu verteilen. Wie in den Versuchen zuvor wurde die Verbindungsmittel mit Hilfe des Motorhebekrans herausgezogen. Die benötigte Auszugskraft wurde mit Hilfe einer Kranwaage gemessen und dokumentiert.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen



Abbildung 4-72: Versuchsaufbau mit Wachsrohling (Maßstab 1:1), Einbringen einer Rampa-Muffe, Ausbruchbild nach Auszugsversuch (v. l. n. r.)

Wie in Abbildung 4-72 rechts zu erkennen, hatten die ersten Auszugsversuche große Ausbruchkegel zur Folge. In dieser Versuchsreihe sollten alle Verbindungsmittel (Abbildung 4-71) hinsichtlich ihrer Auszugsfestigkeit zweimal untersucht werden. Durch die großen Ausbrüche konnte jedoch nicht die gesamte Versuchsreihe vollumfänglich abgeschlossen werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die erreichten normierten Auszugskräfte teilweise höher ausfallen als bei den Versuchen an den kleinen Zylindern. Das kann daran liegen, dass beim großformatigen Wachsrohling größere Randabstände bei den einzelnen Versuchen vorherrschten, als das bei den kleinformatischen Prüfkörpern der Fall war. Bei Betrachtung der Ausbruchbilder wird deutlich, dass die Verbindungsmittel die wirkenden Kräfte auf einen größeren Bereich im Wachskörper übertragen konnten, wodurch größere Wachsteile ausgelöst wurden. Das hatte wiederum höhere Auszugskräfte zur Folge.

Tabelle 4-9: Richtwerte der Auszugskräfte von Holzbauschrauben und Rampa-Muffen bei Versuchen an einem Wachsrohling im Maßstab 1:1

Verbindungsmittel	Gewindelänge l [mm]	Durchmesser Ø [mm]	Auszugskraft F _z [N]	Verhältniss F _z /(l x Ø)
Rampa M16/100	100	21,5	2930	1,36
Rampa M16/80	80	21,5	2550	1,48
Rampa M16/60	60	21,5	1490	1,16
Rampa M12/100	100	18,5	2855	1,54
Rampa M12/80	80	18,5	2455	1,66
Rampa M12/60	60	18,5	1040	0,94
Rampa M10/70**	70	15	156	0,15
Rampa M10/60	60	15	1555	1,73
Rampa M10/50**	50	15	840	1,12
Holzbauschraube 50mm tief**	50	5	1050	4,20
Holzbauschraube 80mm tief**	80	5	1580	3,95
Holzbauschraube 100mm tief*	80	5	2170	5,43
Holzbauschraube 100mm tief*	80	5	2020	5,05
Holzbauschraube 120mm tief*	80	5	2110	5,28
Holzbauschraube 140mm tief*	80	5	2370	5,93

* 80mm vorgebohrt da Bohrer zu kurz und Gewinde jeweils nur 80mm lang

** nur ein Versuch durchgeführt

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Tabelle 4-10: Vergleich der Richtwerte der Auszugsfestigkeiten zwischen kleinformatigen Prüfkörpern und Wachsrohlingen im Maßstab 1:1

Verbindungsmittel	Prüfkörper	Gewindelänge l [mm]	Durchmesser Ø [mm]	Auszugskraft Fz [N]	Verhältniss Fz/(l x Ø)	Vergleich
Holzbauschraube	Kleinprüfkörper	80	5,5	1105	2,51	
Holzbauschraube	Wachsrohling	80	5,5	1580	3,59	30,06%
Holzbauschraube	Kleinprüfkörper	50	5,5	505	1,84	
Holzbauschraube	Wachsrohling	50	5,5	1050	3,82	51,90%
Rampa M10	Kleinprüfkörper	50	15	970	1,29	
Rampa M10	Wachsrohling	50	15	840	1,12	-15,48%
Rampa M10	Kleinprüfkörper	60	15	1160	1,29	
Rampa M10	Wachsrohling	60	15	1555	1,73	25,40%

4.4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich Holzbauschrauben und Rampa-Muffen unterschiedlicher Länge und unterschiedlichen Durchmessers mittels Vorbohren und Einschrauben gut als Verbindungsmittel in gepresstem Wachs eignen. Speziell in den Wachsprüfkörpern, die bei 40 °C und hoher Presskraft hergestellt wurden, konnten Auszugskräfte von zum Teil über 5 kN pro Verbindungsmittel erreicht werden (Rampa-Muffe M10 Tabelle 4-7). Bei einem Gewicht eines großformatigen Wachsrohlings von 1 m³ = 950 kg würden zwei Verbindungsmittel ausreichen, um das gepresste Wachs kraftschlüssig mit der SVE zu verbinden. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass durch ein Erwärmen der Verbindungsmittel der Zwischenschritt des Vorbohrens ohne Einbußen hinsichtlich der Auszugstragfähigkeit entfallen kann. Lediglich Verbindungsmittel, die vor dem Pressprozess in der Pressform fixiert und im Anschluss mit Wachsspänen *umpresst* wurden, zeigten schlechtere Auszugskräfte.

Die Versuche am großformatigen Wachsrohling haben gezeigt, dass durch größere Randabstände, längere Einschraubtiefen und größere Verbindungsmittel die Auszugstragfähigkeit der einzelnen Verbindungsmittel positiv beeinflusst werden kann. Zudem wurde erkannt, dass sich die Ergebnisse aus den kleinformatigen Versuchen auf großformatige Wachskörper skalieren lassen.

Um eine normgerechte Aussage über die tatsächliche Zugfestigkeit von Verbindungsmitteln im gepressten Wachs treffen zu können, muss eine größere Anzahl an Versuchen in einer genormten Versuchseinrichtung/Prüfmaschine durchgeführt und ausgewertet werden. Diese Versuche sind als Richtwerte zu verstehen, um zu verdeutlichen, welche Verbindungsmittel sich grundsätzlich in Körpern aus gepresstem Wachs eignen.

4.5 Geeignete Trennmittel für ConFormWax

Wie in 3.5 beschrieben, kommt bei Schalungen für Betonbaukörper Trennmittel zum Einsatz, um eine Trennschicht zwischen den beiden in Kontakt stehenden Oberflächen (Schalhaut und Betonoberfläche) zu erzeugen. Da davon auszugehen ist, dass speziell Wachsschalungen eine glatte Oberfläche aufweisen, kann mechanische Anhaftungskraft in Folge des Eindringens von Beton in die Schalhaut vernachlässigt werden. Lediglich die Adhäsionskräfte auf molekularer Ebene herrschen vor. Jedoch sind diese von der Größe der in Kontakt stehenden Oberfläche abhängig. Speziell bei Schalungssystemen für freigeformte Betonkörper stellt diese Kraft beim Entschalen der Bauteile eine Herausforderung dar.

Das Trennmittel, das als dünner Film auf die Schalhaut aufgetragen wird, fungiert als Trennschicht zwischen den beiden in Kontakt stehenden Oberflächen und reduziert die Adhäsionskraft auf ein Minimum. Für Schalhäute aus Standardmaterialien wie Holz oder Kunststoff sind derzeit eine Vielzahl an

verschiedenen Trennmitteln auf dem Markt verfügbar. Lediglich für den Einsatz von Wachs als Schalhaut sind derzeit keine erhältlich.

Trennmittel kommen aus zwei Gründen bei Schalungen zum Einsatz:

1. Reduzierung der Anhaftungskräfte zwischen Betonoberfläche und Schalhaut (leichtes Entschalen)
2. Zerstörungsfreies Entschalen/Wiederverwendbarkeit der Schalhaut (speziell bei Freiformschalungen aus z. B. EPS)

Vor allem der zweite Punkt stellt bei diesem automatisierten Herstellungsverfahren für modulare Wachsschalungen keinen Nachteil dar, da gebrauchte Wachsschalungskörper nach dem Entschalen nicht zwingend für ein gleiches Bauteil wiederverwendet werden müssen, da sie zu 100 % recycelt werden können. Trotzdem ist der Einsatz von Trennmittel in diesem Verfahren als sinnvoll zu erachten, da zum einen die Entschalbarkeit erleichtert wird und zum anderen durch zerstörungsfreies Entschalen die Möglichkeit besteht, mehrere Bauteile gleicher Geometrie mit einer einzigen Schalung herzustellen.

In [9] wurden erste Untersuchungen hinsichtlich geeigneter Trennmittel durchgeführt. Das Ergebnis war, dass sich speziell pastöse Trennmittel auf Wachsbasis für die Anwendung auf Wachsschalungen eignen. Als derzeit am Markt erhältliches Trennmittel auf Wachsbasis hat sich Ciri LM-33 der Firma GRACE als zielführend für gegossene Schalungskörper aus Wachs erwiesen. Um dieses Trennmittel und weitere mögliche Trennmittel zu untersuchen, werden in diesem Kapitel die folgenden drei Versuchsreihen durchgeführt:

- Grundsätzliche Eignung verschiedener Trennmittel
- Einfluss der Abzeilabstände auf die Entschalbarkeit
- Einfluss der Fräsbahnplanung auf die Entschalbarkeit

4.5.1 Grundsätzliche Eignung verschiedener Trennmittel

Um neben diesem Trennmittel noch weitere mögliche Trennmittel zu untersuchen, wurde eine Versuchsreihe erstellt, die anhand einer Testgeometrie den Einfluss verschiedener Trennmittel auf die Entschalbarkeit aufzeigen soll.

Anhand einer Testgeometrie (Abbildung 4-73) wurde der Einfluss der einzelnen untersuchten Trennmittel auf die Entschalbarkeit untersucht. Die Testgeometrie hat die Form eines X mit abgerundeten Kanten. Die Oberseite ist eben. Die Flankenseiten des Testkörpers haben einen nach innen geneigten Entschalwinkel von zwei Grad. Dieser ist notwendig, um das Entschalen grundsätzlich zu ermöglichen. Wären die Flanken lotrecht, würde sich der Beton durch sein allgemeines Schwinden zusammenziehen und ein schadfreies Entschalen unmöglich machen.

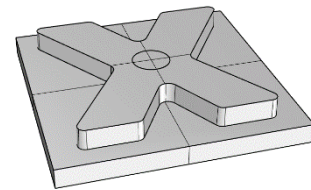


Abbildung 4-73: Digitales Modell der Testgeometrie zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Trennmittel auf die Entschalbarkeit

Folgende Trennmittel wurden untersucht:

- Cire LM33
- Decobio 310
- DM 14-2089
- handelsübliches Silikonspray/Teflonspray

Die Datenblätter zu den einzelnen Trennmitteln sind im Anhang aufgeführt. Als Referenz wurde noch ein Testkörper ohne Trennmittel hergestellt. Durch die Anordnung eines Loches in der Schalung, das mit einem Zwei-Cent-Stück verschlossen wurde, konnten die Testkörper rückseitig pneumatisch entschalt werden, indem Druckluft (Anschluss über eine Rampa-Muffe) in die Kontaktschicht zwischen Betonoberfläche und Schalhaut eingeblasen wurde (Abbildung 4-74). Die einzelnen Trennmittel wurden aufgesprüht (Teflonspray) oder händisch mit Hilfe eines Pinsels in einer dünnen Schicht aufgepinselt.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Für alle Betonagen wurde UHPC Typ Nanodur® der Firma Dyckerhoff verwendet. Es wurden kubische Prüfkörper mit den Herstellparametern T20D6,4kN und T40D10,1 untersucht.

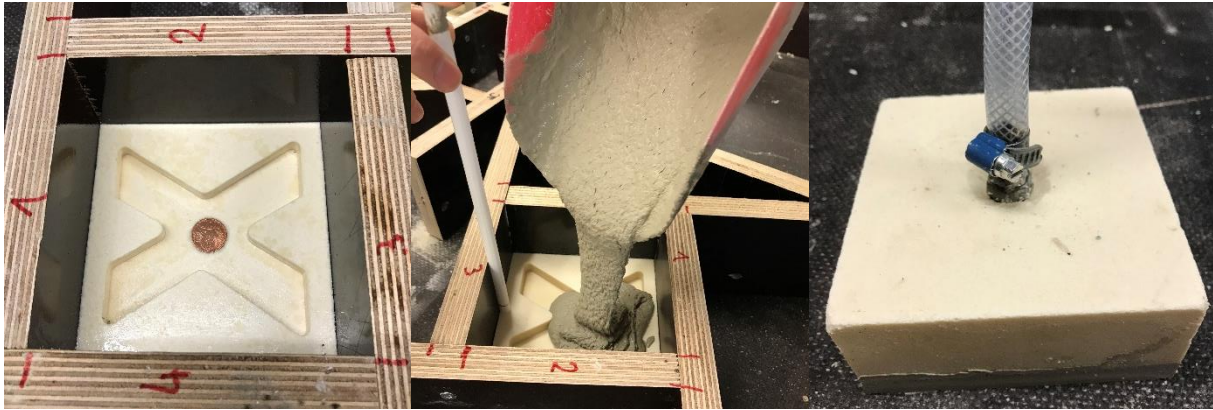


Abbildung 4-74: Darstellung der gefrästen Wachsschalung in Form eines X; Betonage der Schalung; Entschalen des Betonkörpers mit Hilfe von Druckluft (v. l. n. r.)

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt.

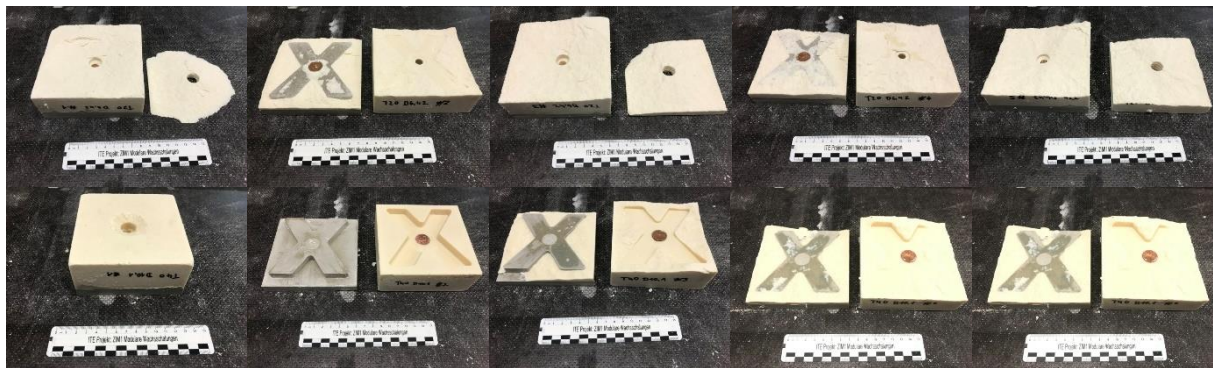


Abbildung 4-75: Obere Reihe – T20D6,4; ohne Trennmittel, Pieri Cire LM 33; Pieri Debcobio 310; Pieri DM 14-2089; Teflonspray (v. l. n. r.); untere Reihe – T40D10,1; ohne Trennmittel, Pieri Cire LM 33; Pieri Debcobio 310; Pieri DM 14-2089; Teflonspray (v. l. n. r.)

Bei den Prüfkörpern T20D6,4 konnte keine Wachsschalung schadensfrei vom Betonkörper gelöst werden, was auf die geringe Festigkeit aufgrund der gewählten Herstellparameter zurückzuführen ist. Der Prüfkörper ohne Trennmittel zeigte das schlechteste Entschalergesult, wohingegen das Trennmittel Pieri Cire LM33 in dieser Versuchsreihe das beste Ergebnis lieferte.

Bei den Prüfkörpern T40D10,1 glichen sich die Ergebnisse mit jenen von Versuchsreihe T20D6,4. Die Prüfkörper ohne Trennmittel zeigten die schlechtesten Ergebnisse. Das beste Ergebnis zeigte das Trennmittel Pieri Grace LM33. Nur dieses konnte eine ausreichende Trennung der Kontaktflächen sicherstellen, sodass hierbei der Betonkörper schadensfrei pneumatisch von der Wachsschalung getrennt werden konnte. Bei diesem Prüfkörper T40D10,1 und dem Einsatz des favorisierten Trennmittels reichten die Festigkeiten (speziell Zugfestigkeiten) der gepressten Wachsprüfkörper aus, um den Betonkörper ohne Beschädigung der Schalung zu entschalen.

Diese Versuchsreihe hat gezeigt, dass sich speziell das Trennmittel Pieri Cire LM33 der Firma Grace für den Einsatz auf gepressten Wachsörpern eignet. Aus diesem Grund kommt es für nachfolgende Versuche bezüglich möglicher Betonagen von Schalungen aus gepressten Wachs zur Anwendung.

4.5.2 Einfluss der Abzeilabstände auf die Entschalbarkeit

Die Glattheit einer Oberfläche hängt von Oberflächenbeschaffenheit ab. Beim Fräsprozess wird diese Oberflächenbeschaffenheit von den gewählten Fräsparametern beeinflusst. Ein schneller Fräsprozess mit großem Zeitspanvolumen liefert eine rauere Oberfläche als ein langsamer Fräsprozess mit kleinem Zeitspanvolumen. Speziell beim Fräsprozess für Freiformgeometrien hängt die Oberflächenbeschaffenheit vom Abstand zwischen den Fräsbahnen eines Fräasers ab. Der Abzeilabstand A (Schnittbreite (Zustellung) a_p) hat direkten Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit (Abbildung 4-76). Je rauer die Oberfläche eines Werkstoffes ist, desto besser kann sich der Beton nach der Betonage an der rauen Oberfläche verklemmen. Hierdurch steigt die benötigte Entschalkraft an, die notwendig ist, um einen Betonkörper von der Schalhaut zu trennen. Der Abzeilabstand hat jedoch nicht nur Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit, sondern auch Auswirkungen auf die Fräsdauer und somit auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Verfahrens. Je geringer der Abzeilabstand ist, desto glatter wird die Wachs Oberfläche. Entsprechend höher ist dann auch die Betonoberflächenqualität. Jedoch verlängert sich dadurch die gesamte Bearbeitungsdauer.

Um den Einfluss des Abzeilabstandes auf die Bearbeitungsdauer und die Oberflächenqualität zu untersuchen, wird eine Versuchsreihe durchgeführt.

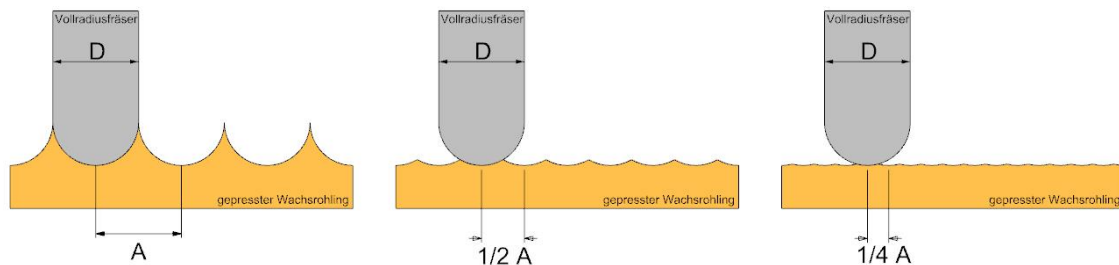


Abbildung 4-76: Darstellung der Abzeilabstände A im Vergleich zum Fräserdurchmesser D

Eine Freiformgeometrie wurde mit vier unterschiedlichen Abzeilabständen (2,0 mm, 1,0 mm, 0,5 mm, 0,1 mm) zerspannt, mit Beton abgegossen und entschalt. Wenn die Fräsdauer der Freiformgeometrie mit dem Abzeilabstand 2,0 mm als Referenzzeit herangezogen wird, dauert im Vergleich dazu die Geometrie mit 1,0 mm doppelt so lange, die Geometrie mit 0,5 mm viermal so lange und die Geometrie mit 0,1 mm 20-mal so lange.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

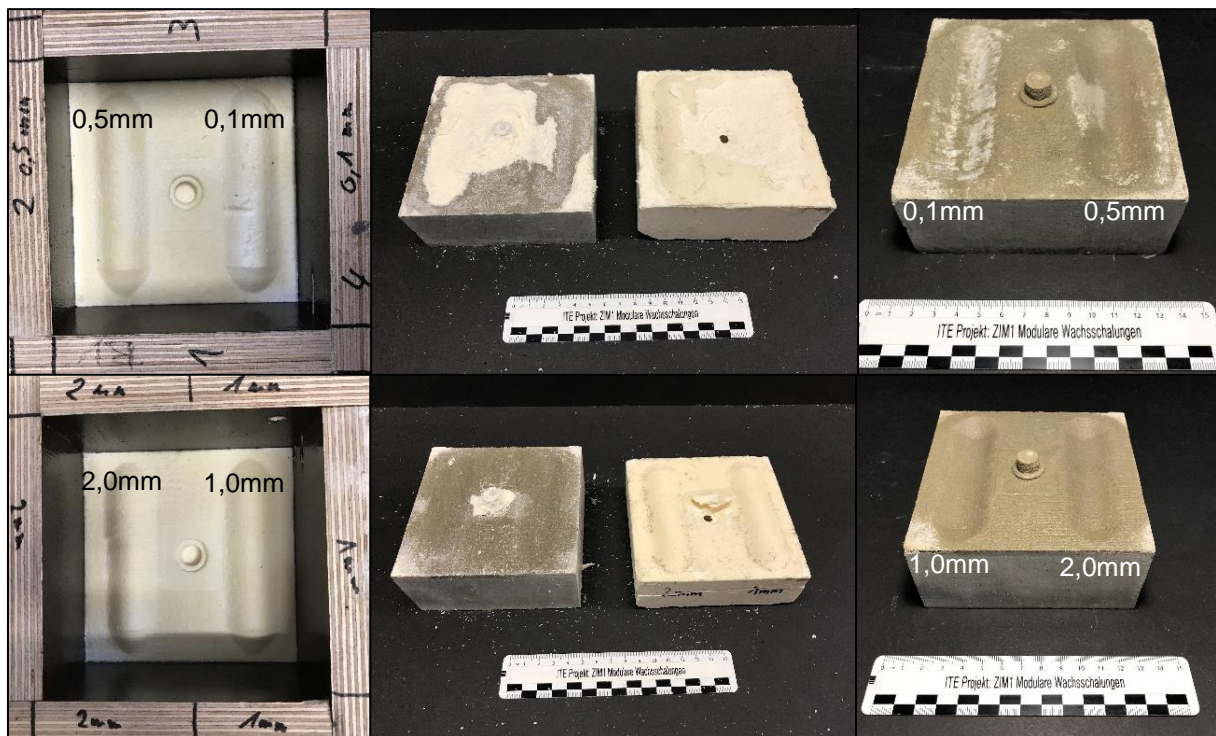


Abbildung 4-77: Obere Reihe – quadratische Wachsrohlinge, Abzeilabstände links: 0,5 mm, rechts: 0,1 mm; untere Reihe – quadratische Wachsrohlinge, Abzeilabstände links: 2,0 mm, rechts: 1,0 mm

In Abbildung 4-77 werden die unterschiedlichen Ergebnisse deutlich. Je geringer die Abzeilabstände im Fräsprozess gewählt werden, desto feiner sollten die Oberfläche der Wachsschalung sowie die Oberfläche des Betonkörpers werden. Werden die Betonkörper in Abbildung 4-77 verglichen, wird deutlich, dass das Optimum bei diesen Wachsrohlingen bei einem Abzeilabstand von 1 mm bis 2 mm (Vollradiusfräser $d=6$ mm) liegt. Wird ein geringerer Abzeilabstand gewählt (z. B. 0,5 mm oder 0,1 mm), fängt die Oberfläche des gepressten Wachsrohlings an zu schmieren. Diese Besonderheit ist darauf zurückzuführen, dass die Oberfläche mit einem Kugelfräser und einer Drei-Achs-Fräse zerspannt wurde. Die Rotationsgeschwindigkeit/Schneidgeschwindigkeit im Zentrum des Fräswerkzeuges ist 0. Da das Zentrum des Fräswerkzeuges der Fräsbahn laut Bahnplanung folgt, findet im Zentrum auf der Linie in einem kleinen Bereich keine Zerspanung statt. Liegen die Fräsbahnen durch die Wahl eines zu geringen Abzeilabstandes eng nebeneinander, findet keine effektive Zerspanung auf der gesamten Oberfläche statt und das Fräswerkzeug schiebt das abzutragende Material lediglich vor sich her. Das Problem kann mit einer Fünf-Achs-Fräse gelöst werden, indem das Fräswerkzeug nicht lotrecht, sondern in einem gewissen Winkel die Oberfläche bearbeitet. Es kann festgehalten werden, dass für den Fräsprozess von Freiformflächen mit Drei-Achs-Fräsen die Abzeilabstände zwischen 1 mm und 2 mm liegen sollten.

Die stellenweise bläuliche Färbung bzw. Schattierung (Abbildung 4-77 rechts) des verwendeten UHPC (Dyckerhoff Nanodur®) ist dabei nicht auf die Wachsschalung zurückzuführen, sondern wird von Sulfiden in der Hochofenschlacke verursacht, die ein Bestandteil des UHPC ist. Die Sulfide an der Oberfläche reagieren mit Wasser im Beton und dies führt zu bläulichen Verfärbungen in Form von Calciumhydrosulfid und Polysulfiden. Nach dem Entschalen baut sich diese Verfärbung auf der Betonoberfläche durch Zutritt von Sauerstoff aus der Umgebungsluft i. d. R. in acht Wochen wieder ab.

4.5.3 Einfluss der Fräsbahnplanung auf die Entschalbarkeit

Um den Einfluss der Fräsbahnplanung sowie des Trennmittels auf die Entschalbarkeit zu untersuchen, wurde die Form einer hyperbolischen Paraboloidschale (HP-Schale) in einen kubischen Wachsprüfkörper gefräst. Ziel war es, die Oberfläche so glatt wie möglich herzustellen. Aus diesem Grund wurde ein Abzeilabstand von 0,1 mm gewählt. Da dieser mit einem Kugelkopffräser (vgl. 4.5.2) nicht zielführend gefräst werden konnte, kam für diesen Versuch ein Einzahn-Schaftfräser $d=6$ mm zum Einsatz. Die Bearbeitungsdauer spielte bei dieser Versuchsreihe eine untergeordnete Rolle. Die Wachsprüfkörper wurden mittels eines Klebestreifens in zwei Hälften unterteilt (Abbildung 4-79 oberes Bilddrittel), um auf einer Hälfte Trennmittel aufzutragen. Dies soll einen Vergleich zwischen den betonierten Oberflächen mit und ohne den Auftrag von Trennmittel nebeneinander ermöglichen. Im Anschluss an die Betonage und nach dem Erhärtungsprozess wurden die gebrauchten Wachsschalungen sowie die hergestellten Betonkörper mittels optischer 3D-Messtechnik vermessen. Damit konnte ein Soll-Ist-Vergleich zwischen den Daten aus der optischen 3D-Messung und dem digitalen Modell erstellt werden. In Abbildung 4-79 sind die Ergebnisse bildhaft dargestellt.

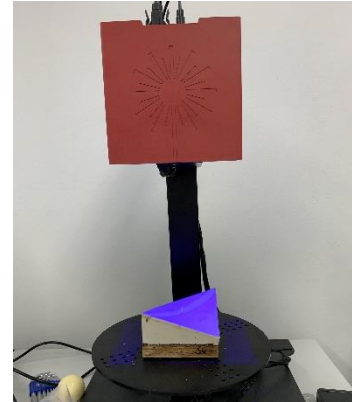


Abbildung 4-78: Versuchsdurchführung der optischen 3D-Vermessung der hyperbolischen Paraboloidschale am Beispiel des Betonkörpers

Auf der im Bild jeweils unteren Hälfte der Wachsschalung wurde vor der Betonage das Trennmittel Pieri Cire LM33 aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich der Beton auf der Hälfte, die mit Trennmittel bestrichen wurde, ohne Rückstände lösen ließ, wohingegen die Seite ohne Trennmittel starke Betonanhaftungen erfuhr. Dies zeigt, dass sich trotz einer feinen und geschlossenen Oberfläche der Schalhaut der Beton ohne Trennmittel mechanisch im Wachs verklemmt und an diesem haften bleibt. Der Versuch zeigt erneut, dass der Einsatz von Trennmittel für die Wachsschalung aus gepresstem Wachs zwingend erforderlich ist. Ein Einfluss der unterschiedlichen Fräsbahnplanung beider Prüfkörper ist visuell sowie im Ergebnis der optischen 3D-Messtechnik nicht erkennbar. Somit hat die Wahl der Frässtrategie in diesem Versuch nur Einfluss auf die Bearbeitungszeit.

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

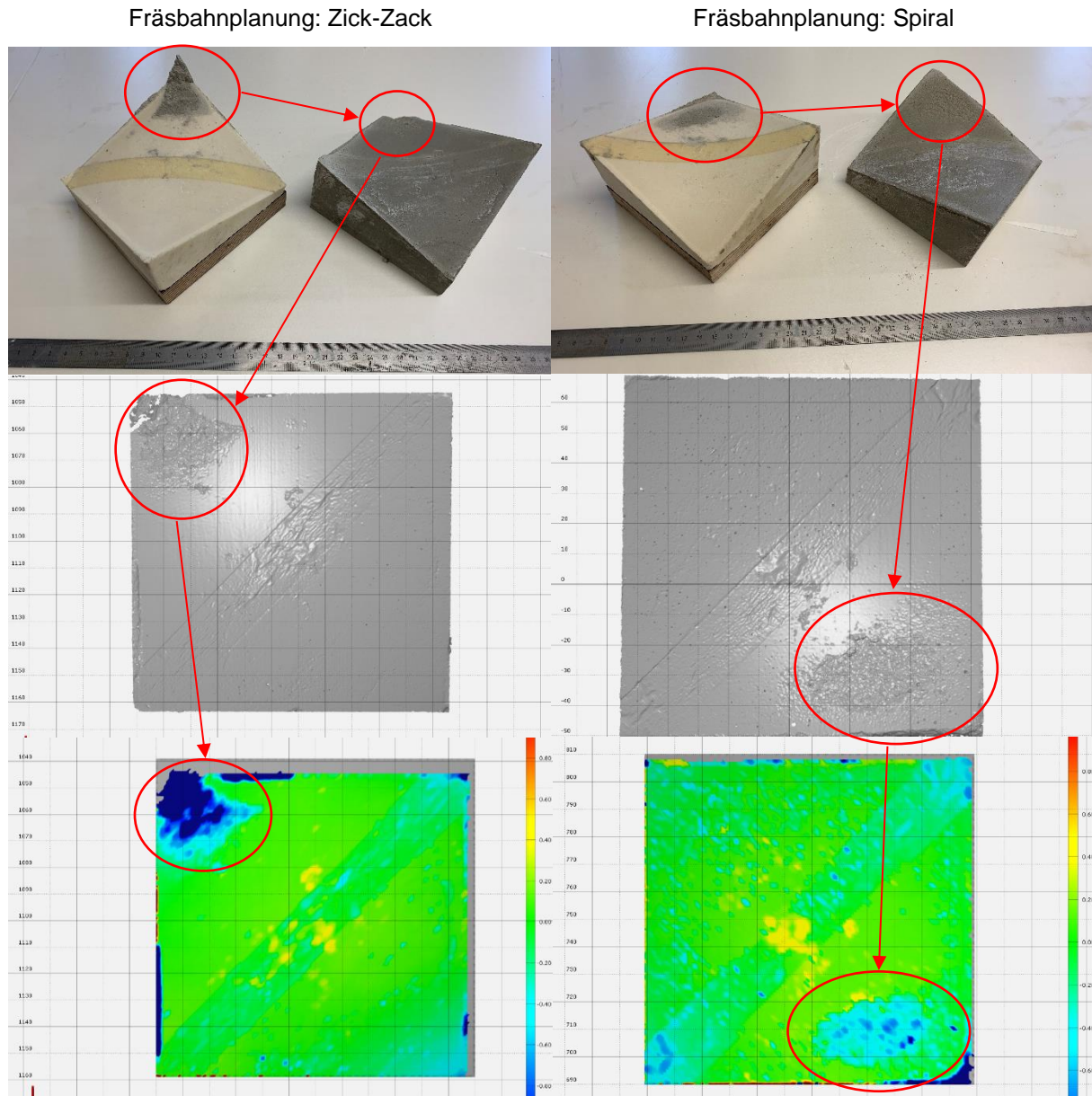


Abbildung 4-79: Einfluss der Fräsbahnplanung (Zick-Zack, Bahnplanung, Spiralbahnplanung (v. l. n. r.)) sowie der Einsatz von Trennmittel auf die Wachsschalung und den Betonkörper in Form einer hyperbolischen Paraboloidschale (HP-Schale); Bildaufnahmen nach dem Entschalen; Darstellung der optischen 3D-Vermessung; Soll-Ist-Vergleich zwischen dem Ergebnis der optischen 3D-Vermessung und dem digitalen Modell (v. o. n. u.)

4.5.4 Zusammenfassung

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich das Trennmittel Pieri Cire LM33 unter den getesteten Trennmitteln am besten für den Einsatz auf gepresstes Wachs eignet. Die durchgeführten Versuche in diesem Kapitel haben gezeigt, dass selbst komplexe Geometrien unter Einsatz dieses Trennmittels hergestellt werden können, ohne die Schalung oder den Betonkörper zu beschädigen. Auch die glatte Oberfläche gepresster Wachsprüfkörper reicht nicht aus, um auf den Einsatz von Trennmittel zu verzichten. Zudem haben die Versuche gezeigt, dass nur quadratische Prüfkörper mit gesteigerter Festigkeit (T40D10,1) und einer Trennmittelschicht in der Lage sind, die Zugkräfte aufzunehmen, die beim pneumatischen Entschalen komplexer Geometrien mit steilen Entschalwinkeln herrschen, um eine Wachsschalung zerstörungsfrei von einem freigeformten Betonbauteil zu trennen.

4.6 Entwicklung eines Recyclingprozesses

Um das Alleinstellungsmerkmal dieses Herstellungsprozesses vollumfänglich zu entwickeln, müssen die gebrauchten Wachsschalungsmodule in deren Ausgangsprodukt zurückgeführt werden können. Wachsschalungsmodule bestehen aus dem aufgepressten Wachs sowie der Stahlverbindungseinheit (SVE) als Trägerplatte. Gebrauchte Wachsschalungsmodule müssen nach ihrer Verwendung so recycelt werden, dass das aufgepresste Wachs von den SVE getrennt und der gepresste Wachskörper an sich wieder in pressbare Wachsspäne verarbeitet werden kann. Die Trennung des aufgepressten Wachses von der SVE stellt keine Schwierigkeit dar, da, wie in 4.4 beschrieben, die Verbindungsmittel, die das aufgepresste Wachs und die SVE kraftschlüssig verbinden, reversibel sind. Durch das Herausdrehen der Verbindungsmittel können das aufgepresste Wachs und die SVE problemlos voneinander getrennt werden. Das Recyceln der gepressten Wachsspäne stellt hingegen eine größere Herausforderung dar. Um das Wachs wieder in seine Ausgangsform (Späne) zu überführen, müssen die Kontaktkräfte, die sich zwischen den Wachsspänen durch das Zusammenpressen gebildet haben, gelöst werden. Um diesen Prozess-Schritt zu erforschen, wird im Folgenden untersucht, ob es möglich ist, das gepresste Wachs durch geeignete Mahltechniken in Späne zu überführen.

4.6.1 Mahlversuche

Da für diese Versuche spezielle Mühlen notwendig waren und nicht bekannt war, welche Mühlen zielführend sind, wurden die Experimente bei der Firma Jehmlich in Nossen durchgeführt. Bei Jehmlich ist ein Versuchslabor eingerichtet, um verschiedene Mühlen hinsichtlich ihrer Mahleigenschaften bei unterschiedlichsten Stoffen von Industriepartnern zu untersuchen. Grundsätzlich müssen im Folgenden zwei verschiedene Strategien entwickelt werden. Zum einen muss der Prozess untersucht werden, der aus der gängigsten Lieferform des ConFormWax (Pellets d= 5mm, Abbildung 4-5) Wachsspäne erzeugt. Der zweite Prozess, der zu erforschen ist, muss das gepresste Wachs in dessen Ausgangsform (Wachspulver/-späne) zurückführen.

Ziel dieser Versuche war es, eine möglichst ähnliche Spangrößenverteilung wie in den Versuchen in 4.2.1.1 zu erhalten. 90 % aller erzeugten Späne sollten $\leq 2,0$ mm sein. Um die Wachspellets zu Spänen/Pulver mit den zuvor beschriebenen Anforderungen zu verarbeiten, war eine Prallmühle vom Typ Universalmühle REKORD B-SN mit 2,5 mm Conidur und einer Geschwindigkeit von 75 m/s zielführend (Abbildung 4-83 rechts). Diese Mühle kann bis zu 300 kg/h mahlen. Um gepresste Wachskörper wieder in Späne zu verarbeiten, wurde eine Hammermühle Typ HM671 mit 4,0 mm Stabrostsieb als zielführend angesehen (Abbildung 4-82 rechts). Die Spangrößenverteilung im Vergleich zu den in 4.2.1.1 durchgeführten Sieblinienuntersuchungen ist in Abbildung 4-80 einzusehen.

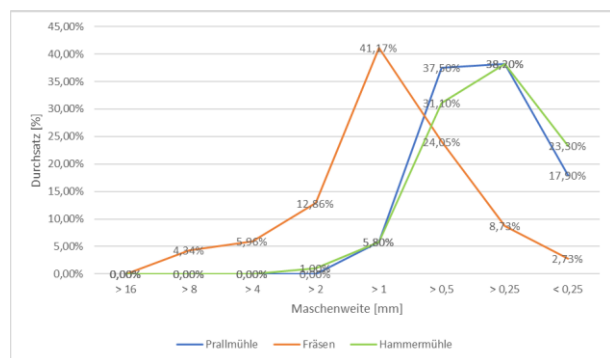


Abbildung 4-80: Vergleich Sieblinien Fräsen und Mahlen von Wachs (Partikelgrößenverteilung)

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

Beide Mühlen liefern ähnliche Ergebnisse (blaue und grüne Linie) hinsichtlich der Verteilung der erzeugten Späne/Pulver. Im Vergleich zu den durch Fräsen der Wachstafeln erzeugten Wachsspänen (Herstellung von Wachsspänen 4.2.1.1) sind die Späne, die durch das Mahlen von Wachs erzeugt werden, feiner. Der Verlauf der drei Kurven ähnelt sich stark. Folglich werden bei einem automatisierten Prozess, wie es das Mahlen mit Industriemühlen ist, die erzielten Ergebnisse wiederholgenauer bezüglich der Partikelgrößenverteilung. Der simple Prozess (4.2.1.1), durch Fräsen von Wachstafeln Späne zu produzieren, liefert ein größeres Spektrum (Streuung) an Partikelgrößen. Aus diesen Versuchen wird deutlich, dass es für den zu erforschenden automatisierten Prozess unumgänglich ist, Wachsspäne durch Mahlen mit Industriemühlen herzustellen. Nur so können eine gleichbleibende Qualität und hinreichend ähnliche Partikelgrößen für den späteren Prozess gewährleistet werden. In Abbildung 4-81 (vgl. Abbildung 3-25) ist der Recycling-Prozess in Form eines Ablaufdiagramms dargestellt. Rot umrandet ist der (Teil-) Prozess, der aus Wachspellets (Lieferform des Wachses ab Werk) pressbares Wachspulver herstellt. Der grün umrandete Bereich spiegelt den (Teil-)Prozess wider, der aus nicht mehr verwendeten Wachsschalungen (gepresste Wachskörper) Späne produziert. In Abbildung 4-82 und Abbildung 4-83 sind die beiden unterschiedlichen Mühlentypen mit den aus dem jeweiligen Prozess produzierten Wachsspänen bzw. dem Wachspulver dargestellt.

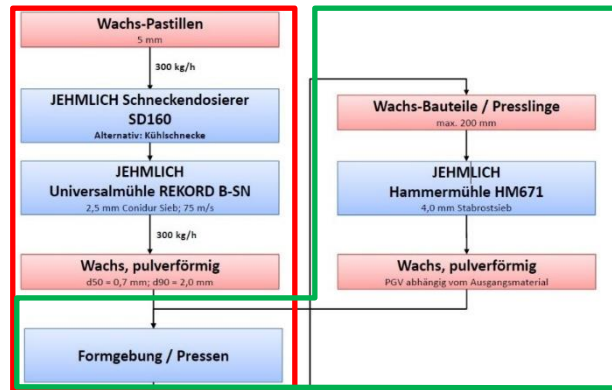


Abbildung 4-81: Ablaufdiagramm des Mahlprozesses



Abbildung 4-82: Hammermühle HM671 (Innenansicht), Mahlergebnis gepresster Wachsprüfkörper mit Hammermühle; Hammermühle HM671 Produktfoto © Fa. Jehmlich (v. l. n. r.)



Abbildung 4-83: Universalmühle/Prallmühle Rekord B-SN (Innenansicht), Mahlergebnis der Wachspellets mit Prallmühle; Universalmühle/Prallmühle Rekord B-SN Produktfoto © Fa. Jehmlich (v. l. n. r.)

In der ersten Versuchsreihe wurde Wachs in Form von Pellets und gepressten Wachsprüfkörpern mit unterschiedlichen Mühlen in kleinen Mengen (<10 kg) zielführend gemahlen. Werden größere Mengen an Wachs kontinuierlich über einen längeren Zeitraum gemahlen, erwärmen sich die Mühlen in Folge von Reibung durch Kontakt mit dem Mahlgut und induzieren diese Wärme in das Wachs. Es ist davon

auszugehen, dass das Wachs bei einem kontinuierlichen Mahlprozess die Mühle verklebt und zusetzt. Nur wenn sichergestellt ist, dass auch große Mengen über einen langen Zeitraum gemahlen werden können, kann der automatisierte Gesamtprozess in Zukunft wirtschaftlich und ökologisch eingesetzt werden. Aus diesem Grund wurde eine zweite Versuchsreihe die Zerkleinerung durch Mahlen von größeren Mengen (~100 kg) betreffend durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass es speziell bei Raumtemperaturen von über 20 °C zum Aufschmelzen des Produkts in der Prallmühle Rekord B kommt. Der Energieeintrag bei diesem Mühlentyp ist durch höhere Umdrehungsgeschwindigkeiten größer, als es bei der Hammermühle der Fall ist.

Nach ca. 30 kg Wachspellets war eine weitere Zerkleinerung aufgrund von aufgeschmolzenem Wachsmaterial nicht mehr möglich. Ein weiterer Dauermahlversuch wurde am Morgen bei Temperaturen von unter 20 °C durchgeführt. Alle Pellets (~150 kg) ließen sich ohne Aufschmelzen des Materials mahlen. Um auch bei höheren Temperaturen die Prallmühle einsetzen zu können, können CO₂-Pellets den Wachspellets zugeführt werden, die das Material während des Mahlprozesses kühlen und im Anschluss rückstandslos verdampfen. Die Hammermühle verursachte aufgrund ihres geringeren Wärmeeintrags bei allen Mahlversuchen zu keiner Zeit Probleme. Die Versuchsprotokolle sind dem Anhang beigelegt.

4.6.2 Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs mit den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4

Wie zuvor beschrieben, werden die Späne durch das Mahlen im Vergleich zur Herstellung der Späne durch Abfräsen von gegossenen Wachstafeln feiner. Da die in 4.2.2 durchgeführten Druckfestigkeitsuntersuchungen an Wachsprüfkörpern durchgeführt wurden, die auf Basis der in 4.2.1.1 produzierten Späne hergestellt wurden, werden zur abschließenden Betrachtung die Druckfestigkeiten von gepressten Wachsproben untersucht, die durch Mahlen mit Industrieböhlen (Recycling-Prozess) hergestellt wurden, um die Ergebnisse aus 4.2 vergleichbar zu machen.

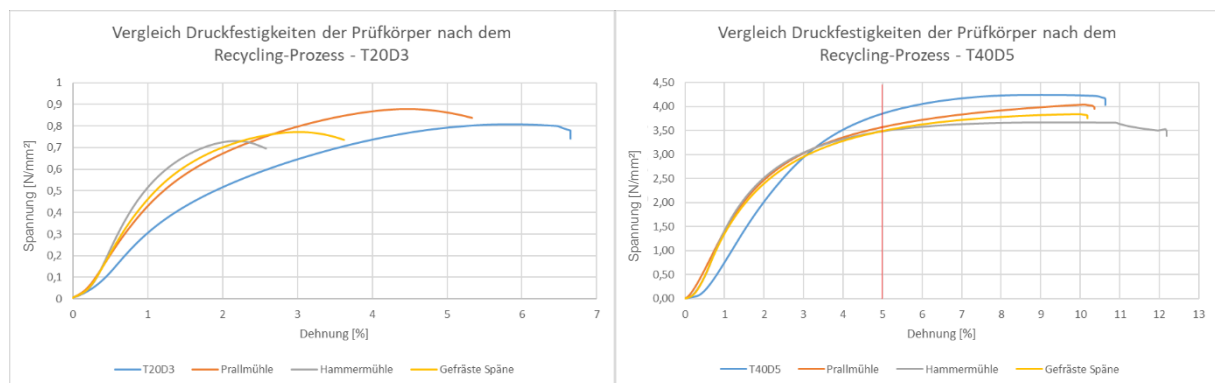


Abbildung 4-84: Vergleich der gemittelten Druckfestigkeiten von Wachsprüfkörpern nach dem jeweiligen Recycling-Prozess mit unterschiedlichen Spänen; blaue Kurve – Spanherstellung durch Abfräsen von Wachstafeln (Referenz); gelbe Kurve – Späne, die beim Fräsprozess angefallen sind; graue Linie – Wachsspäne, die mit Hilfe der Hammermühle aus gepressten Wachsrohlingen hergestellt wurden; orangefarbene Linie – Wachsspäne, die mit Hilfe der Prallmühle aus Wachspellets hergestellt wurden – T20D3; T40D5 (v. l. n. r.)

In Abbildung 4-84 werden die gemittelten Druckfestigkeiten von gepressten Wachs-Probekörpern verglichen. Als Ausgangsmaterial für die Probekörper wurden Wachsspäne/-pulver aus den im Folgenden beschriebenen unterschiedlichen Spanherstellungsprozessen verwendet:

- Blau: Späne wurden laut 4.2.1.1 mittels Zerspanung von gegossenen Wachstafeln produziert
- Orange: Späne wurden mit Hilfe einer Prallmühle aus Wachspellets hergestellt
- Grau: Späne wurden aus gepressten Wachsrohlingen mit Hilfe einer Hammermühle hergestellt
- Gelb: Späne, die während des Fräsprozesses durch Zerspanen gepresster Wachsrohlinge anfallen

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

In der Abbildung wird deutlich, dass die Prüfkörper mit den Herstellparametern T20D3, die aus Spänen hergestellt wurden, die den Recycling-Prozess durchlaufen haben (gelbe, orange und graue Kurve), ähnliche maximale Druckfestigkeiten aufweisen wie die Referenzprobe (blaue Kurve). Es wird jedoch deutlich, dass die Prüfkörper aus dem Recycling-Prozess früher versagen und somit ein spröderes Gefüge besitzen, als es bei der Referenzprobe der Fall ist.

Im Vergleich dazu zeigen die Druckfestigkeiten der Prüfkörper, die bei T40D5 hergestellt wurden, dass die Festigkeit der Prüfkörper, die aus Spänen aus dem Recycling-Prozess hergestellt wurden, um etwa 10 % geringen ausfällt (bei 5 % Dehnung) als bei den Referenz-Wachsprüfkörpern (blaue Kurve). Diese Tatsache kann auf die in Abbildung 4-80 dargestellten Mahlergebnisse zurückgeführt werden. Anscheinend hat eine geringe Partikelgrößenverteilung bei den Prüfkörpern T20D3 einen Einfluss auf die Sprödeheit und bei Prüfkörpern T40D5 negative Auswirkungen auf die Druckfestigkeiten der gepressten Wachssproben. Es ist somit in Zukunft sinnvoll, auf eine ausgewogene Partikelgrößenverteilung zu achten, um ein homogenes Wachsspangefüge im gepressten Wachskörper zu erhalten.

4.6.3 Mikroskop-Aufnahmen unterschiedlicher Wachsspäne

Aufgrund der unterschiedlichen Druckfestigkeiten in 4.6.2 zwischen den Wachsspänen aus dem Recycling-Prozess und den Wachsspänen, die nach 4.2.1.1 produziert wurden, wurden exemplarisch zwei verschiedenen hergestellte Wachsspantypen mikroskopisch untersucht. Mit Hilfe eines Systemmikroskops Typ Leica DM LM wurden die beiden unterschiedlichen Wachsspantypen in verschiedenen Vergrößerungen fotodokumentarisch festgehalten, um diese im Nachgang zu vergleichen und detaillierte Rückschlüsse auf die Größe und Form der jeweiligen Wachsspantypen zu ziehen. Die unterschiedlichen Spanformen und -größen können einen Anhaltspunkt bezüglich der unterschiedlichen Druckfestigkeiten liefern.



Abbildung 4-85: Systemmikroskop Typ Leica DM LM

In Abbildung 4-86 sind die Mikroskop-Aufnahmen der Wachsspäne dargestellt, die nach 4.2.1.1 produziert wurden. Bei diesen Aufnahmen wird deutlich, dass die Spangrößenzusammensetzung breit gestreut ist. In Abbildung 4-86 (links) (140-fache Vergrößerung) ist zu sehen, dass sowohl groß- sowie kleinformatige Späne vorhanden sind. Bei höheren Vergrößerungsstufen (280-fach und 600-fach) wird die Oberflächenbeschaffenheit eines Spans dargestellt. Es sind auf der Oberfläche orientierte Rillen zu erkennen, was auf die Richtung und den Einsatz von Fräswerkzeugen hindeutet.

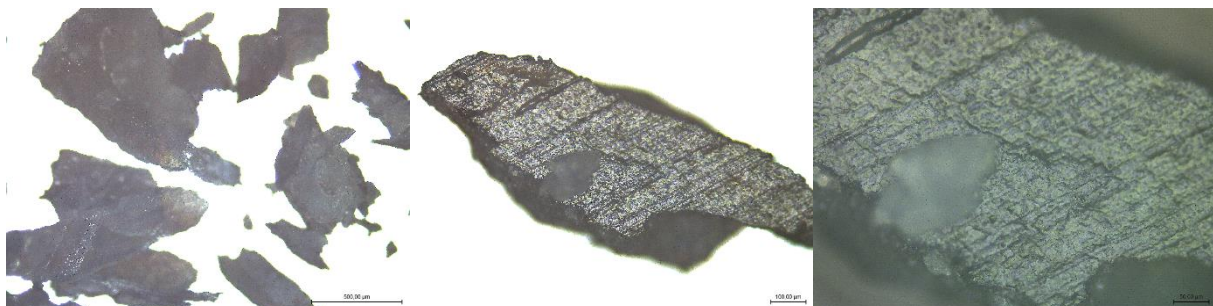


Abbildung 4-86: Darstellung der Aufnahmen (mittels des Systemmikroskops Typ Leica DM LM) jener Wachsspäne, die nach 4.2.1.1 produziert wurden – 140-fach; 280-fach; 600-fach (v. l. n. r.)

Analog dazu wurden die Wachsspäne mikroskopisch untersucht, die nach dem Recycling-Prozess von gepressten Wachsprüfkörpern durch den Einsatz einer Hammermühle produziert wurden. In Abbildung 4-87 sind die Späne mit unterschiedlichen Vergrößerungen (140-fach, 260-fach und 600-fach) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Spangrößenverteilung kleiner ausfällt, was die Ergebnisse

4. Untersuchungen der Material-Prozess-Interaktion für die Verwendung von CFW für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen

in Abbildung 4-80 bestätigt. Außerdem ist erkennbar, dass auf der Oberfläche des Wachsspanns keine orientierte Rillenoberfläche durch Zerspanung erkennbar ist. Vielmehr ähnelt die Oberfläche einer Bruchkante. Die Späne ähneln eher feinem Granulat als Spänen.

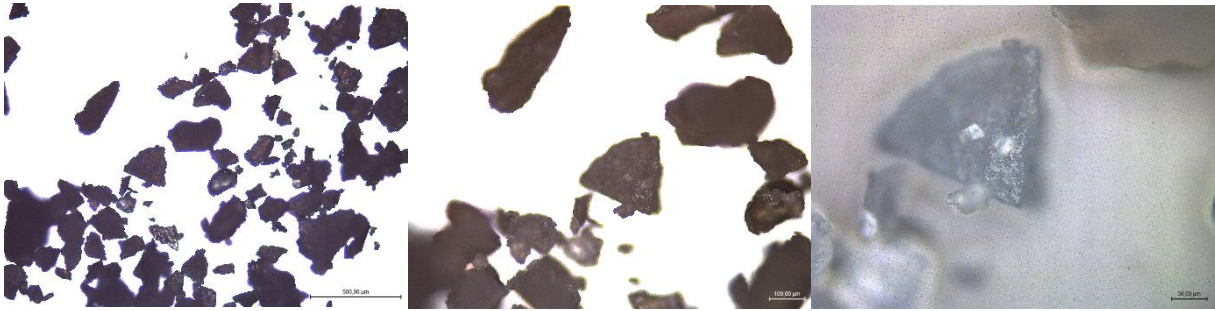


Abbildung 4-87: Darstellung der Aufnahmen mittels Systemmikroskop Typ Leica DM LM der Wachsspäne, die aus gepressten Wachsprüfkörpern mit Hilfe einer Hammermühle hergestellt wurden – 140-fach; 280-fach; 600-fach (v. l. n. r.)

4.6.4 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass durch einen zielführenden Einsatz von speziell auf das Wachsmaterial und die Teilprozesse abgestimmten Mühlen sowohl gepresste Wachskörper als auch das Liefergut des Wachsmaterials in pressbare Späne überführt werden können. Diese Untersuchungen ermöglichen es in Zukunft, den gesamten Recycling-Prozess industriell nutzbar zu machen. Zudem stellt das zu entwickelnde Herstellungsverfahren durch einen funktionierenden Recycling-Prozess ein Alleinstellungsmerkmal am Markt dar und wird somit dem immer stärker werdenden Gedanken der Nachhaltigkeit gerecht. Nur durch dieses Alleinstellungsmerkmal bietet das Verfahren einen Mehrwert für die Industrie und wird dadurch konkurrenzfähig gegenüber am Markt etablierten Lösungen.

5 Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

Anhand drei unterschiedlicher Demonstratoren sollen die Leistungsfähigkeit sowie Wirtschaftlichkeit des vollautomatischen Herstellungsprozesses freigeformter Betonbaukörper auf Basis von gepressten Wachsrohlingen als Schalung untersucht werden. Alle nachfolgenden für die Fertigung der Demonstratoren benötigten Wachsschalungsrohlinge wurden bei Raumtemperatur und einer Pressspannung von $4,46 \text{ N/mm}^2$ hergestellt. Bedingt durch die vorhandene Großpresse der Kooperationsfirma B+S Engineering und deren maximale Presskraft von 3500 kN bei einem Durchmesser von 1000 mm konnten lediglich Wachsrohlinge mit einer Presskraft/-spannung von rund $4,46 \text{ N/mm}^2$ hergestellt werden ($\frac{3.500.000 \text{ N}}{\pi \times 1000^2 / 4} = 4,46 \text{ N/mm}^2$). Zudem war es im Forschungsprojekt nicht möglich, die großen Mengen an Wachsspänen, die für die Wachsschalungsrohlinge der Demonstratoren benötigt wurden, vor dem Pressprozess zu temperieren. Es konnten somit analog zu den kleinformigen Wachsprüfkörpern nur die Herstellparameter T20D3,5 in Bezug auf die großformatigen Wachsrohlinge abgebildet und untersucht werden.

5.1 Herstellung einer freigeformten Stütze im Maßstab 1:3

5.1.1 Stützendesign

Um die Leistungsfähigkeit der zu entwickelnden Schalungstechnologie deutlich zu machen, wurde ein geometrisch komplexes Stützendesign entwickelt, das den Möglichkeiten der zu entwickelnden Schalungstechnologie gerecht wird und diese verdeutlicht. In Abbildung 5-1 ist der Stützenentwurf abgebildet.

Der Stützenfuß ist in Form eines auf einer Seite spitz zulaufenden Ovals ausgeführt. Zum Stützenkopf hin weitet sich der Querschnitt fächerförmig auf. Solch eine Geometrie ist mit Standardschalungssystemen kaum herstellbar.

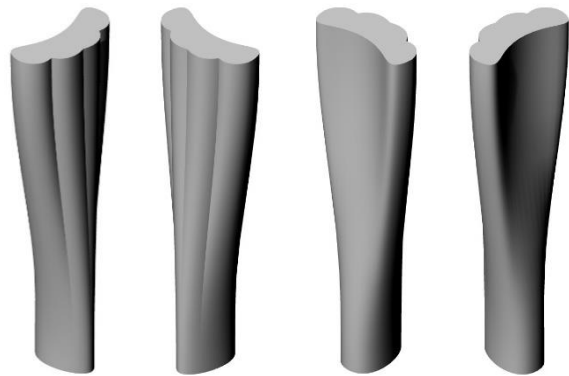


Abbildung 5-1: Digitaler Stützenentwurf, Ansicht aus vier Perspektiven

5.1.2 Fräsbahnplanung

Da zu diesem Zeitpunkt im Forschungsprojekt noch keine Gesamtschalung aus mehreren zusammengesetzten Schalungsmodulen hergestellt werden konnte, wurde die Stütze längsseitig halbiert (Abbildung 5-2 links). Beide Stützhälften werden in die CAD/CAM-Software überführt und auf einem Wachsschalungsmodul *abgelegt* (Abbildung 5-2 rechts).

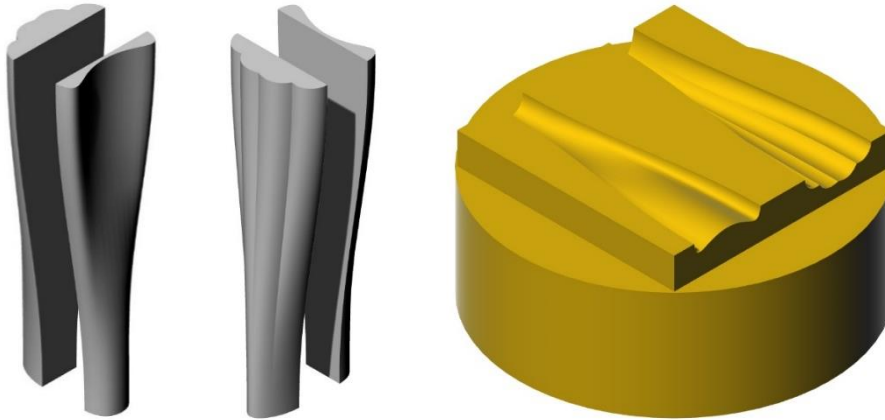


Abbildung 5-2: Digitaler Stützenentwurf, halbierte Stütze, zu fräsende Geometrie im Wachs (v. l. n. r.)

Im Anschluss daran wurde die Fräsbahnplanung software-technisch durchgeführt. Diese teilt sich, wie in 3.3.2 beschrieben, in zwei Schritte auf. Der erste Schritt bei einer spanenden Bearbeitung ist das *Schruppen*. Beim Schruppen wird der Werkstoff mit einem hohen Zeitspannvolumen stufenweise abgenommen. Die Oberflächengüte spielt bei diesem Fräsprozess eine untergeordnete Rolle. Dabei wird beim Fräsen ein gewisser Abstand zu der zu fräsenden Geometrie eingehalten (Schlichtzugabe), um im ersten Schritt möglichst viel Material abzutragen. Im zweiten Schritt, dem *Schlichten*, wird das Material, das noch auf der Geometrie verblieben ist, möglichst fein und mit möglichst kleinen Abzeilabständen abgenommen, um die finale Oberflächengeometrie zu erhalten. In Abbildung 5-3, Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 sind der gesamte Fräsprozess bzw. die Fräsbahnplanung im digitalen Modell abgebildet.

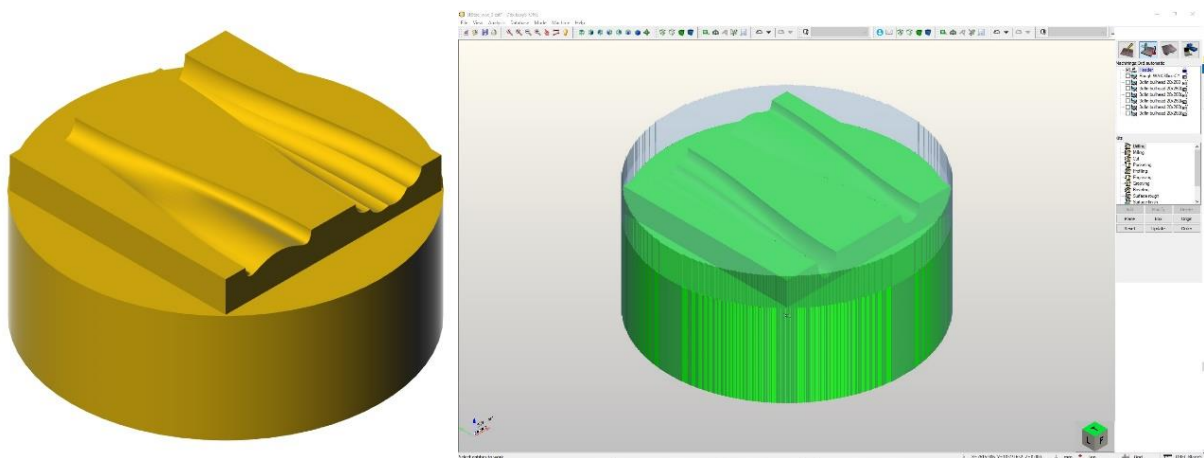


Abbildung 5-3: CAD-Soll-Geometrie; CAD-Modell in CAM-Software (v. l. n. r.)

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

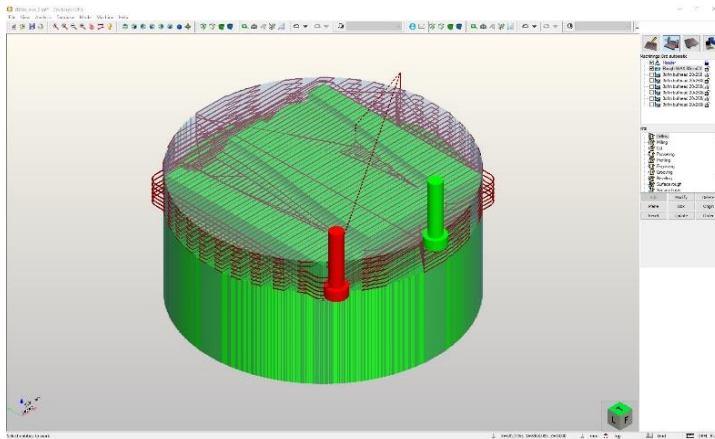


Abbildung 5-4: Darstellung des Schrupp-Prozesses in der CAM-Software; virtuelles Fräsergebnis nach dem Schrupp-Prozess (v. l. n. r.)

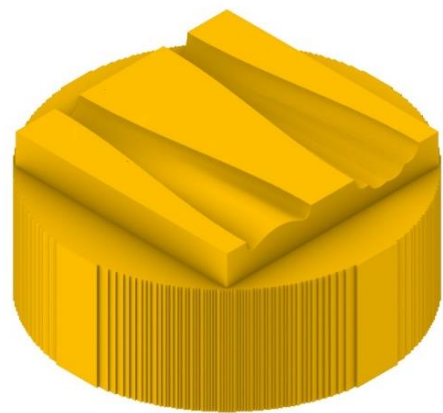
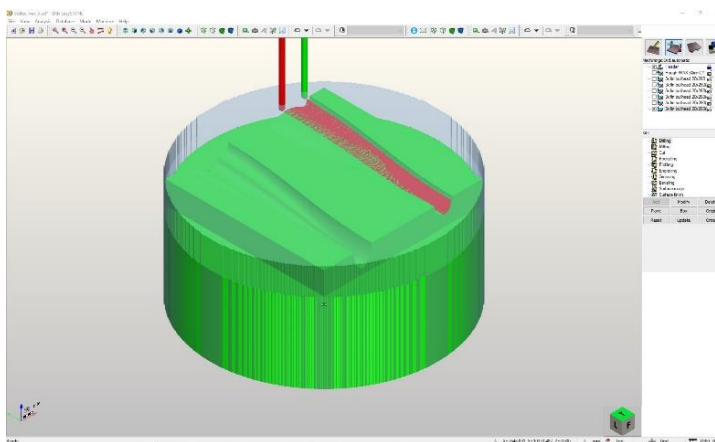


Abbildung 5-5: Darstellung des Schlicht-Prozesses in der CAM-Software; virtuelles Fräsergebnis nach dem Schlicht-Prozess (v. l. n. r.)

Auf Basis der gewählten und im Folgenden dargestellten Fräseparameter und Fräser errechnet die Software eine Bahnplanung für den Schrupp- sowie Schlichtprozess. Für den Schrupp-Prozess wurde ein Walzenstirnfräser (Durchmesser 80 mm, Schneidenhöhe 40 mm, Abbildung 5-6) ausgewählt, da dieser schon zuvor (vgl. 4.2.1.1) gute Fräsergebnisse bei der Zerspänung von Wachstafeln lieferte. Folgende Fräseparameter wurden für den Schrupp-Prozess in Vortests bestimmt und erwiesen sich als zielführend für ein hohes und somit effektives Zeitspanvolumen:

Vorschubgeschwindigkeiten v_f : 9000 mm/min
 Drehzahl des Fräfers n : 7000 U/min
 Arbeitseingriff a_e : 20 mm
 Schnittbreite (Zustellung) a_p : 35 mm



Abbildung 5-6: Walzenstirnfräser $d=80$ mm, vier Schneiden

Während des gesamten Schrupp-Prozesses wurden die Späne mittels Druckluft vom Werkstück weggeblasen, um eine Doppelzerspanung zu verhindern und den Fräser zu kühlen. Der Schrupp-Prozess dauerte ca. 22 min. Dabei wurden ca. 0,0812 m³ Wachs zerspant. Das ergibt ein Zeitspanvolumen von ca. 0,244 m³/h. Der Arbeitseingriff von 20 mm kann auf 40 mm erhöht werden. Hierdurch halbiert sich die Bearbeitungszeit im Schrupp-Prozess. Frästests mit einer Schnitttiefe von 40 mm wurden im Nachgang durchgeführt.

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

Der gesamte Schlichtprozess (Abbildung 5-5) wurde mit einem Kugelkopffräser (Durchmesser = 20 mm, Abbildung 5-7) durchgeführt. Folgende Fräsparmeter für den Schrupp-Prozess wurden in Vortests bestimmt und erwiesen sich als zielführend:

Vorschubgeschwindigkeiten v_f : 8000 mm/min
Drehzahl des Fräasers n : 6000 U/min
Schnittbreite (Zustellung) a_p : 2 mm



Abbildung 5-7: Kugelkopffräser $d=20$ mm, zwei Schneiden

Die Wahl des Bahnabstands stellt zwei Aspekte gegenüber, die es bestmöglich zu erfüllen gilt: zum einen eine hohe Oberflächengüte des gefrästen Wachses, was für einen geringen Bahnabstand spricht, zum anderen eine möglichst schnelle Bearbeitung des Werkstücks, was für einen hohen Bahnabstand spricht. Aufbauend auf den kleinmaßstäblichen Versuchen in 4.5.2 wurde ein Bahnabstand für Wachsschalungen von 1 mm bis 2 mm als sinnvoll angesehen. Aufgrund des größeren Fräswerkzeugs wird für diesen Versuch ein Bahnabstand von 2 mm festgelegt. Die Bearbeitungszeit des Schlichtprozesses dauerte ca. 28 min. Dabei wurden ca. 0,004 m³ Wachs zerspan. Dies ergibt ein Zeitspanvolumen von ca. 0,009 m³/h. Das gefräste Wachsschalungsmodul wurde bei der Firma GOM GmbH (Gesellschaft für optische Messtechnik) mittels optischer 3D-Messtechnik vermessen und mit Hilfe der Software GOM Inspect mit dem digitalen CAD-Modell verglichen. Dadurch konnten exakte Rückschlüsse auf die Maßhaltigkeit des Fräsprozesses und die Wachsschalung gezogen werden. In Abbildung 5-8 ist der Soll-Ist-Vergleich (CAD zu Messdaten) der Wachsschalung vor der Betonage dargestellt.

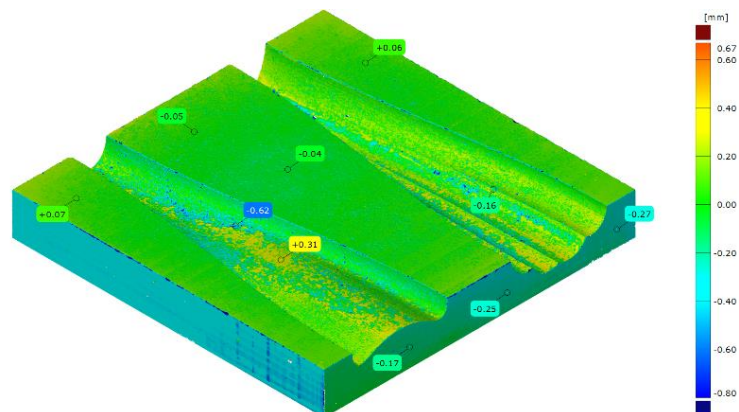
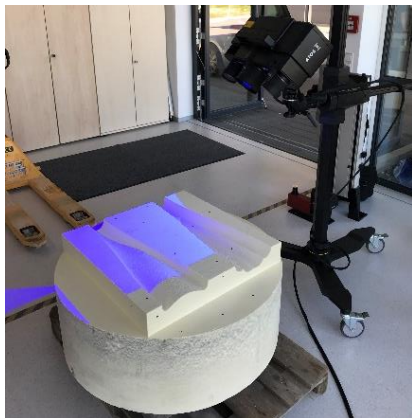


Abbildung 5-8: Optische 3D-Messtechnik der Wachsschalung; Soll-Ist-Vergleich der Wachsschalung mit dem digitalen Modell (v. l. n. r.)

Bis auf einige punktuelle Abweichungen von zwischen +0,3 mm und -0,6 mm beträgt die Maßhaltigkeit der Gesamtschalung $\pm 0,2$ mm. Die erreichte Maßhaltigkeit der Wachsschalung reicht aus, um hochpräzise Betonbauteile herstellen zu können.

5.1.3 Betonage und Vermessung

Im Anschluss an die Vermessung der Wachsschalung wurde sie mit dem Trennmittel GRACE Ciri LM-33 bestrichen und mit UHPC, Typ: Nanodur® von Dyckerhoff, betoniert. Nach einer Erhärtungszeit von 24 Std. wurden die beiden Stützhälften ausgeschalt. Sie wurden wiederum bei der Firma GOM GmbH mit einem 3D-Messverfahren optisch vermessen. Zudem wurde abermals ein Soll-Ist-Vergleich mit der Software GOM Inspect durchgeführt, um die Maßhaltigkeit der produzierten Stützhälften zu überprüfen. In Abbildung 5-9 sind die Ergebnisse dieses Vergleichs dargestellt.

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

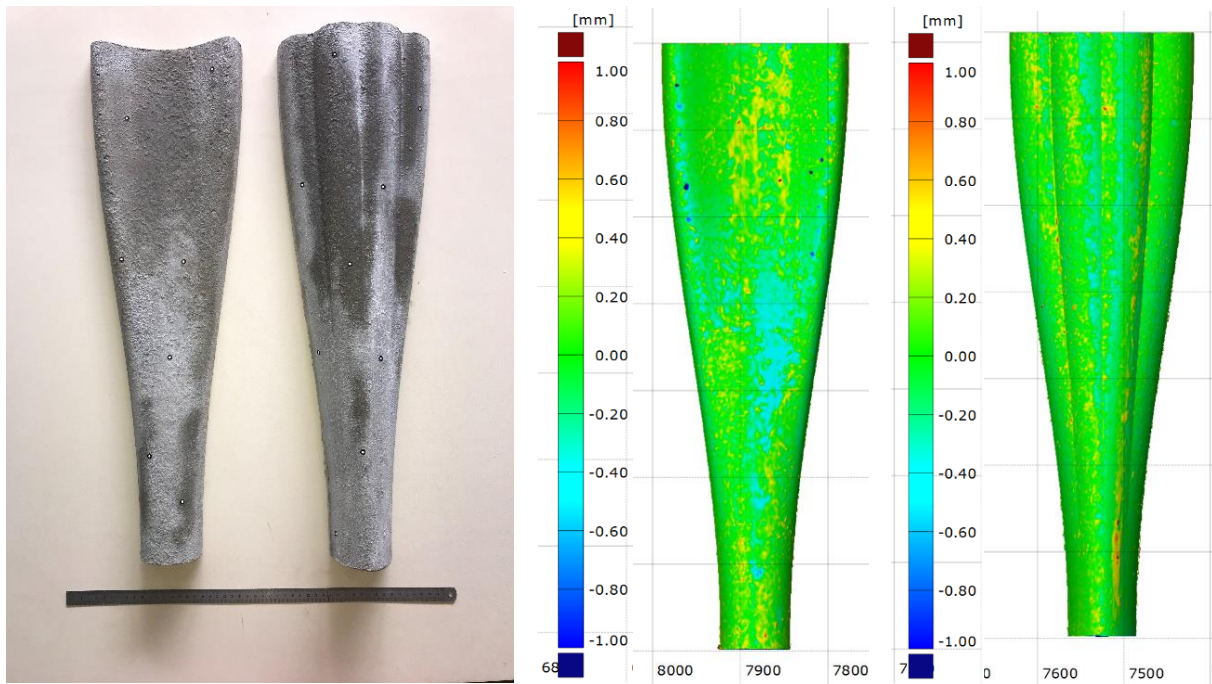


Abbildung 5-9: Ausgeschaltete Stützhälften aus UHPC; Soll-Ist-Vergleich der Stützhälften mit dem digitalen Modell (v. l. n. r.)

Die erreichte Maßhaltigkeit bei der Herstellung der Schalung spiegelt sich im Abguss der Wachsschalung mit UHPC wider. Wie in Abbildung 5-9 dargestellt, weisen die Stützhälften eine Maßhaltigkeit von $\pm 0,2$ mm auf, was im Betonbau als sehr maßhaltig anzusehen ist. Lediglich wenige, kleine lokale Stellen weisen Maßtoleranzen zwischen $\pm 1,0$ mm auf. Diese lokalen Abweichungen sind darauf zurück zu führen, dass einzelne kleine Wachsspäne während des Fräsprozesses aus dem Gefüge gerissen und nicht sauber zerspant wurden. An diesen Stellen entstanden Vertiefungen, die sich auf der Oberfläche der Stützhälften zeigen und in den digitalen Messdaten widerspiegeln. Dieses Problem kann in Zukunft durch Anpassungen der Fräsbahnplanung (Schrägstellung des Kugelkopffräasers), das Temperieren der Wachsspäne vor dem Pressvorgang auf 40°C sowie durch höhere Presskräfte behoben werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Herstellung dieses Demonstrators im Maßstab 1:3 problemlos möglich war. Die gesamte Bearbeitungszeit betrug ca. 50 min. Dies liegt über der Bearbeitungszeit von EPS, jedoch besitzt die Wachsschalung höhere Festigkeiten im Vergleich zum Styropor, was wiederum einen Vorteil in Bezug auf die Formtreue der herzustellenden Betonbauteile darstellt. Auch die erreichte Maßhaltigkeit der Wachsschalung und des daraus entstandenen Betonbauteils von $\pm 0,2$ mm ist im Kontext der Toleranzen im Bauwesen (vgl. 2.2) zufriedenstellend.

5.2 Herstellung eines Schachtsammlers

5.2.1 Herstellung der Schalung

Um zu zeigen, dass der entwickelte vollautomatisierte Herstellungsprozess bauteilunabhängig ist, wird in diesem Kapitel ein Tiefbau-Fertigteil in Form eines Schachtsammlers hergestellt. Diese Bauteile sind, wie in 2.1.2 beschrieben, serielle Unikate und werden kundenspezifisch für den jeweiligen Einsatzort auf Abruf gefertigt. Zusammen mit der Kooperationsfirma wurde ein Entwurf eines Schachtsammlers entwickelt, der die Leistungsfähigkeit des Herstellprozesses belegt (Abbildung 5-10). Der Schachtsammler hat einen Durchmesser von 1000 mm, mittig ein Hauptgerinne mit sich verjüngendem Durchmesser und zwei Gerinne mit unterschiedlichen Leitungsdurchmessern, die nach links und rechts geschwungen abgehen. An den Stirnseiten der Leitungen sind Anschluss-Geometrien mit Bohrungen vorgesehen, um später Standardpassstücke mit Dichtungen an den Schalungskörper aus Wachs anzusetzen.

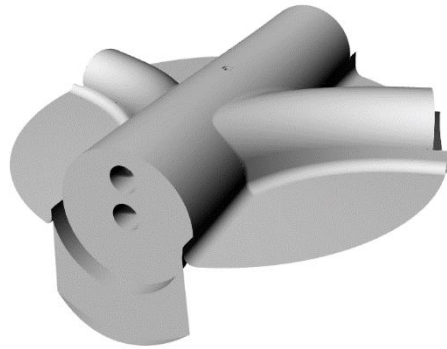


Abbildung 5-10: Darstellung des digitalen Negativmodells des herzustellenden Schachtsammlers

Anhand dieses Entwurfs wurde in der CAM-Software die Fräsbahnplanung entwickelt. Aufbauend auf den zuvor durchgeführten Großfräsversuchen wurden in diesem Fräsprozess die gleichen Fräserwerkzeuge und Fräsparmeter analog zu 5.1.2 gewählt. Auch hier teilt sich der Fräsprozess in einen Schrupp- und einen Schlichtprozess auf.

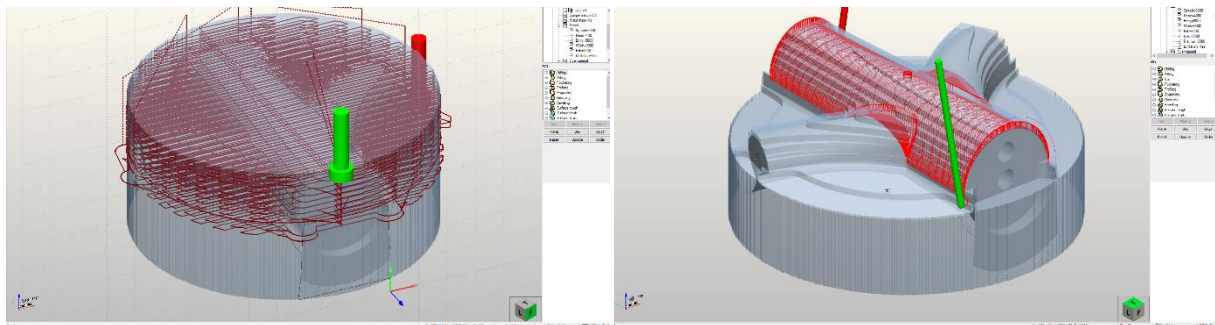


Abbildung 5-11: Darstellung des Schrupp-Prozesses mit einem Walzenstimfräser $d=80$ mm in der CAM-Software; Darstellung des Schlichtprozesses mit einem Kugelpfritfräser $d=25$ mm in der CAM-Software (v. l. n. r.)

Nach dem digitalen Entwurf des Fräsprozesses wurde der Wachsrohling ($d=1000$ mm $h \approx 450$ mm) mit Vakuumsaugern auf dem Frästisch befestigt (Abbildung 5-12 links). Im Anschluss daran begann der Schrupp-Prozess (Abbildung 5-12 mittig, rechts). Dieser dauerte etwa 40 min und es wurden ca. $0,122$ m³ Wachs zerspan, was einem Zeitspanvolumen Q von ca. $0,183$ m³/h entspricht.



Abbildung 5-12: Wachsrohling mit Vakuumtechnik auf dem Frästisch; Wachsrohling nach dem Schrupp-Prozess; Nahaufnahme der Oberflächenqualität nach dem Schrupp-Prozess (v. l. n. r.)

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

Auf den Schrubb-Prozess folgte der Schlichtprozess, mit dem die finale Geometrie des benötigten Schalungsnegativs hergestellt wird (Abbildung 5-13). Der Schlichtprozess dauerte ca. 100 min und es wurden ca. 0,0143 m³ Wachs zerspan, was einem Zeitspanvolumen Q von ca. 0,0086 m³/h entspricht.



Abbildung 5-13: Wachsrohling während des Schlichtprozesses; Wachsrohling nach dem Schlichtprozess, seitliche Aufnahme; Wachsrohling nach dem Schlichtprozess, frontale Aufnahme (v. l. n. r.)

Nach dem Schlichtprozess wurde der Schalungskörper mittels optischer 3D-Messtechnik vermessen und mit den CAD-Daten verglichen. Der Soll-Ist-Abgleich ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Die Maßhaltigkeit liegt in fast allen Bereichen bei $\pm 0,2$ mm. Lediglich wenige lokale Bereiche weisen Ungenauigkeiten von $\pm 0,6$ mm auf.

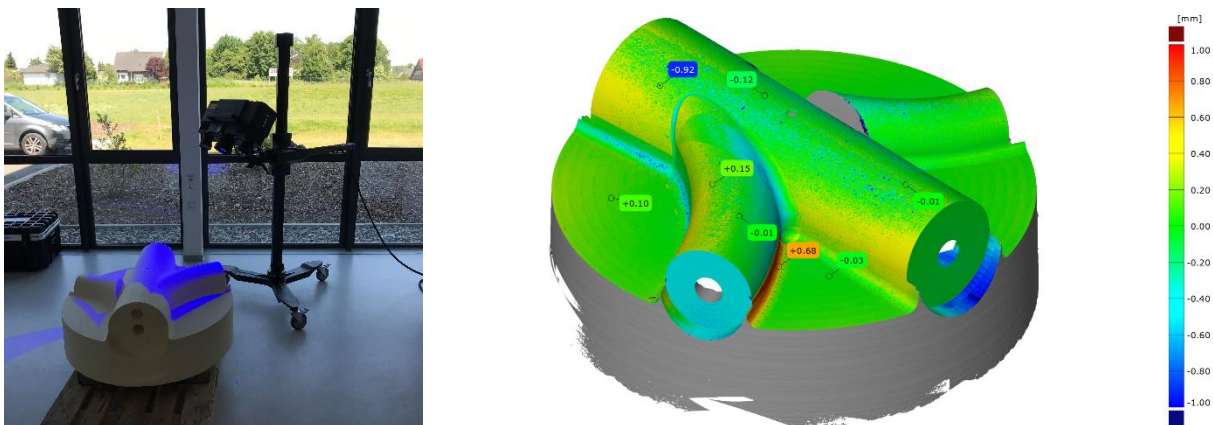


Abbildung 5-14: Darstellung der optischen 3D-Messung des Wachsschalungsnegativs bei der Firma GOM GmbH in Braunschweig; Ergebnis des Soll-Ist-Vergleichs des Wachsschalungsnegativs (v. l. n. r.)

5.2.2 Betonage und Herstellung des Betonkörpers

Im Anschluss an die Herstellung des Schalungskörpers wurde die Gesamtschalung für den herzustellenden Schachtsammler zusammengesetzt. Diese besteht aus Einzelteilen, die sich aus geometrischer Sicht wiederholen und somit wiederverwendet werden können (Stahlaußenschalung und Anschlussgeometrien für die Dichtung), und aus solchen, deren Geometrie sich von Schacht zu Schacht ständig ändert. Mehrmals wiederverwendete Teile der Gesamtschalung wurden aus Stahl oder Kunststoffen hergestellt, um eine hohe Wiederverwendungsrate zu gewährleisten (Abbildung 5-15). Die sich von Produkt zu Produkt ändernden Geometrien wurden aus dem recycelbaren CFW hergestellt (Abbildung 5-15). Die Wachsschalung wurde mit Trennmittel (Pieri Cire LM33) bestrichen und mit handelsüblichem C30/37-Beton (Größtkorn 16 mm, Konsistenz F6) ausbetoniert. Während der Betonage kam ein mechanischer Rüttler zum Einsatz, um den Beton bestmöglich zu entlüften. Der Einsatz dieser Komponenten soll zeigen, dass die Wahl der Betonsorte auf das Herstellverfahren keinen Einfluss hat. Zudem soll der Einsatz von Rüttlern illustrieren, dass das Material ausreichende

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

Festigkeiten besitzt, um auch solchen äußeren Einwirkungen Stand zu halten und trotzdem hohe Genauigkeiten zu liefern.



Abbildung 5-15: Wachsschalungsnegativ mit aufgesetzten Anschlussgeometrien inkl. Beschichtung dieser mit grünem Trennmittel speziell für EPS; Zusammengebaute Gesamtschalung für die Herstellung des Schachtsammlers; Betonage der Schalung; zum Teil ausgeschalteter Schachtsammler (v. l. n. r.)

Nach einer Erhärtungszeit von ca. 72 h wurde versucht, das Wachsschalungsnegativ mittels Druckluft kopfüber aus dem Betonkörper zu drücken. Hierbei zeigte sich, dass sich zwar die Oberfläche des Gerinnes vom Beton löste und die Luft entweichen konnte. Jedoch klemmte der Wachsrohling entlang seiner Wandung am Betonkörper fest und es kam zum Ausriss eines Wachskegels. Dieses Problem ist zum einen darauf zurück zu führen, dass der Entschalwinkel der zylindrischen Grundform lediglich ein Grad betrug, und zum anderen, dass erst nach 72 h versucht wurde, das Betonbauteil zu entschalen. Nach Rücksprache mit einem Hersteller für Betonschachtsammler wird dort ein Betonkörper nach max. 12 h vom Schalungskörper getrennt, da es sonst zum *Einklemmen* der innenliegenden Schalung durch das Schwinden des Betons kommt.



Abbildung 5-16: Versuch der pneumatischen Entschalung; händisches Rausbrechen der Wachsschalung; Entnahme eines Teils der Wachsschalung (Gerinne) (v. l. n. r.)

Das Wachs musste händisch aus dem Betonschachtsammler herausgebrochen werden. Lediglich der Teil der Wachsschalung, der das Gerinne bildete, konnte in einem Stück entnommen werden.

Nach dem Entschalen des Betonschachtsammlers wurde dieser wiederum vermessen und mit den CAD-Daten verglichen (Abbildung 5-17). Es zeigte sich, dass die Maßhaltigkeit in fast allen Bereichen des hergestellten Betonbauteils bei $\pm 0,2$ mm lag. Lediglich wenige lokale Bereiche wiesen Abweichungen von $\pm 0,4$ mm auf. Es ist anzumerken, dass unter Berücksichtigung der Maßhaltigkeit des Wachsschalungsnegativs (Abbildung 5-14) und des Schwindens des Betons während des Erhärtungsprozesses die erzielte Genauigkeit für den Einsatz als Tiefbaufertigteil mehr als zufriedenstellend ist.

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

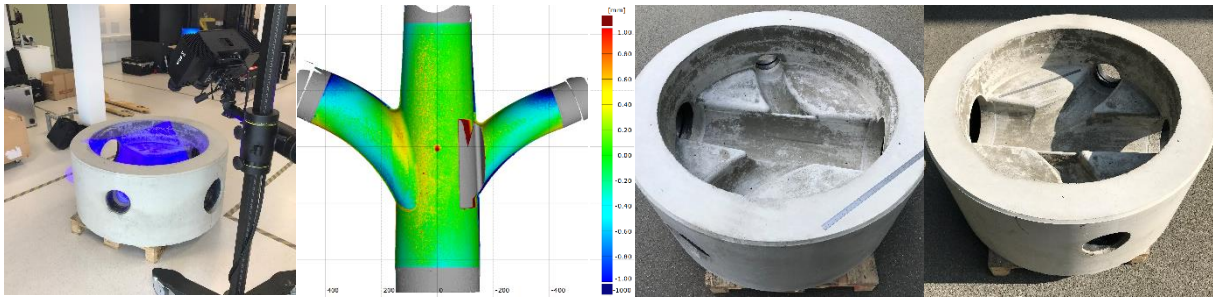


Abbildung 5-17: Darstellung der optischen 3D-Messung des Betonschachtsammlers durch die Firma GOM GmbH in Braunschweig; Soll-Ist-Abgleich des Betongerinnes; hergestellter Betonschachtsammler, seitliche Aufnahme 1; hergestellter Betonschachtsammler, seitliche Aufnahme 2 (v. l. n. r.)

5.3 Herstellung einer freigeformten Stütze im Maßstab 1:1

5.3.1 Zusammenfügen einzelner Module zu einer Gesamtschalung

Um großformatige Betonbaukörper im Maßstab 1:1 herstellen zu können, muss eine Aufbaustrategie entwickelt werden, die es ermöglicht, die einzelnen Schalungsmodule zu einer Gesamtschalung zusammenzusetzen. Diese wurde vorab entwickelt und soll später bei der Herstellung des Demonstrators im Maßstab 1:1 auf ihre Umsetzbarkeit hin überprüft werden.

Die Gesamtwachsschalung besteht aus beliebig vielen Wachsschalungsmodulen, die durch geeignete Verschraubungen kraftschlüssig miteinander verbunden werden. In Abbildung 5-18 ist die Aufbaustrategie dargestellt.

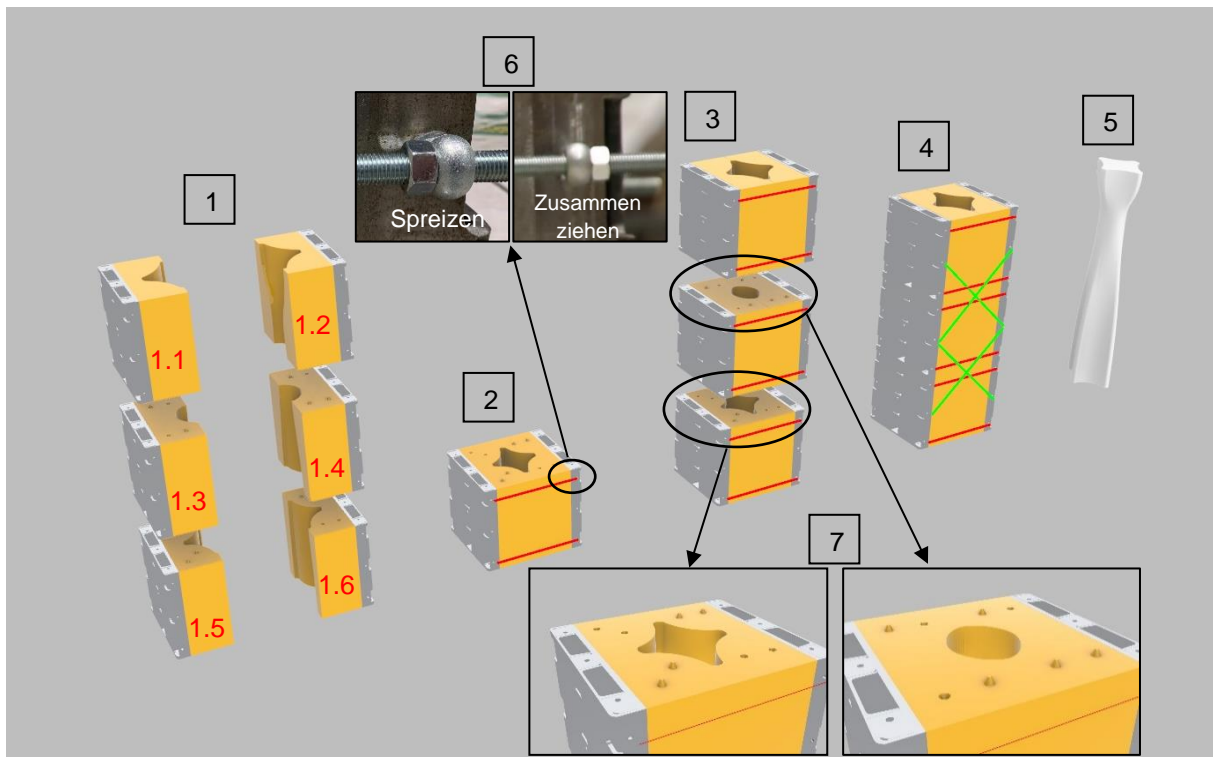


Abbildung 5-18: Aufbaustrategie der Wachsschalungsmodule

Aufbaustrategie (Abbildung 5-18)

1. Die zu erstellende Stützegeometrie wird anhand der Größe der Stahlverbindungseinheit digital in die notwendige gerade Anzahl unterteilt. Die geometrischen Teilstücke/-volumen der Stütze werden im CAD-Programm automatisch von den Stahlverbindungseinheiten abgezogen. Somit

erstellt die Software automatisch die benötigte Schalung aus Wachsschalungsmodulen, die für die Herstellung der Stütze benötigt werden.

2. Nach der spanenden Bearbeitung aller Wachsschalungsmodule werden die jeweiligen Schalungspaare zu einem Schalungsblock mit Hilfe von Gewindestangen (rot) kraftschlüssig verbunden.
3. Im Anschluss daran werden alle Schalungsblöcke ähnlich dem Legoprinzip aufeinandergestapelt. Die Stahlverbindungsmodule (Verbindung Stahl zu Stahl) werden miteinander durch handelsübliche Gewindeschrauben und Muttern verbunden.
4. Durch die in grün dargestellten kreuzweise angeordneten Gewindestangen werden die einzelnen Schalungsblöcke kraftschlüssig miteinander verbunden.
5. Nach der Betonage, dem Erhärtungsprozess des Betons und dem Ausschaln ist die Betonstütze fertig und die Wachsschalung kann dem Recycling-Prozess zugeführt werden.

Ausschalstrategie (Abbildung 5-18)

Nach dem Abbinden/Erhärtungsprozess des Betons werden die in Abbildung 5-18 grün dargestellten kreuzweise angeordneten Gewindestangen gelöst und demontiert. Im Anschluss daran werden die Muttern der rot dargestellten Gewindestangen, die die zwei Wachsschalungselemente zusammenhalten, auf der gegenüberliegenden Seite der Augenschraube montiert. So können die beiden Schalungselemente auseinander gespreizt werden (Abbildung 5-18 Nr.6).

Logistiksystem (Abbildung 5-18)

Jedes Wachsschalungsmodul wird mit einem handelsüblichen QR-Code versehen, der die folgenden Informationen enthält:

- Index des jeweiligen Wachsschalungsmoduls,
- Herstelldatum/Charge,
- Ggfls. Adresse des Lieferorts,
- Abmessungen des Moduls,
- Gewicht des Moduls,
- Position des Moduls in der Gesamtschalung,
- Benötigte Verbindungsmittel,
- Nachbarmodule und Ausrichtung.

Anhand dieses QR-Codes und der darin enthaltenen Informationen kann die Schalung vor Ort oder im Werk zusammengesetzt und aufgebaut werden. Um jedoch jedes einzelne Wachsschalungsmodul zu einem Einzelstück zu machen, um Verwechslungen oder eine falsche Montage auszuschließen, sind auf den Stirnseiten jedes Moduls individuelle männlich-weibliche Steckverbindungen (Noppen – Erhebungen/Vertiefungen auf einer Oberfläche) vorgesehen (Abbildung 5-18 Nr.7). Diese Steckverbindungen dienen zum einen der Individualität jedes einzelnen Wachsschalungsmoduls und zum anderen ermöglichen sie einen präzisen und sicheren Aufbau der Gesamtschalung. Dieser gleicht einem Baukastensystem. Die Steckverbindungen sind auf den Seiten der Wachsschalungsmodule vorgesehen, wo sich zwei berühren.

5.3.2 Herstellung des finalen Demonstrators

Um die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu verdeutlichen, wurde das Stützendesign (vgl. 5.1.1) überarbeitet und ein komplexerer Stützenentwurf wurde für den Bau des Demonstrators entwickelt und verwendet. In Abbildung 5-18 Nr.5 sind der finale Entwurf sowie der geplante Aufbau der Gesamtschalung für die Herstellung des Demonstrators dargestellt. Um die Schalung fertigen zu können, wurden insgesamt sechs Wachsrohlinge (Abbildung 5-18 Nr.1) benötigt. Ein Wachsrohling war aus einem vorhergehenden Großpressversuch vorhanden. Aufgrund des Zeitraums (Dezember 2018 – Februar 2019), in dem der Demonstrator laut Arbeitspaket hergestellt werden soll, mussten im Januar 2019 die noch benötigten fünf Wachsrohlinge gepresst werden. Vier davon wurden aus Wachsspänen

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

gepresst, die zu Beginn des Forschungsvorhabens mittels Zerspanung von Wachstafeln (4.2.1.1) hergestellt und auf 5 mm Größtkorn gesiebt wurden. Der fünfte Wachsrohling wurde aus Wachsspänen gepresst, die zuvor bereits einmal gepresst und im Nachgang wieder zerspant wurden (Spanabfall beim Fräsprozess der beiden Demonstratoren davor).

Tabelle 5-1: Herstelltemperatur und Material der Wachsrohlinge

Wachsrohling-Nr.	Temperatur bei Herstellung	Wachsspanmaterial
1	20°C	Späne aus gefrästen Wachstafeln; Größtkorn 2mm
2	8°C	Späne aus zuvor gepressten und wieder zerspannten Spänen
3	8°C	Späne aus gefrästen Wachstafeln; Größtkorn 2mm
4	8°C	Späne aus gefrästen Wachstafeln; Größtkorn 2mm
5	8°C	Späne aus gefrästen Wachstafeln; Größtkorn 2mm
6	8°C	Späne aus gefrästen Wachstafeln; Größtkorn 2mm

Aufgrund der klimatischen Bedingungen in der Produktionshalle (Standort der Großpresse) war es nicht möglich, die klimatischen Rahmenbedingungen zu schaffen, um die Wachsspäne auf eine Temperatur von 20 °C zu erwärmen. Wie in 4.2.2 beschrieben, hat die Temperatur großen Einfluss auf die Festigkeit der gepressten Wachsrohlinge, weshalb zu diesem Zeitpunkt davon auszugehen war, dass die Festigkeit der herzustellenden fünf Wachsrohlinge gering und ggfls. nicht ausreichend für die Herstellung der Schalung des Demonstrators sein würde. Aufgrund zeitlichen Drucks (Projektende am 28.02.2019) und des Ziels, zum Projektende einen aussagekräftigen Demonstrator hergestellt zu haben, wurde entschieden, die fünf Wachsrohlinge trotz der geringen Wachsspanntemperatur zu pressen. In Abbildung 5-19 sind zwei der fünf Stücke abgebildet. Die Höhe der Rohlinge beträgt ca. 350 mm.



Abbildung 5-19: Zwei der fünf gepressten Wachsrohlinge, die bei 8 °C gepresst wurden.

Im Anschluss an den Pressprozess wurden die fünf Wachsrohlinge am DBFL spanend bearbeitet. Die Werkzeugwahl, die Frässtrategie sowie die Fräsparemeter wurden für den Schlicht-Prozess analog zu 5.1.2 beibehalten. Lediglich für den Schrapp-Prozess wurde ein größerer Fräser als zielführend angesehen, um das Zeitspanvolumen zu erhöhen und die Bearbeitungszeit für den Schrapp-Prozess zu reduzieren. In Abbildung 5-20 ist der verwendete Fräser abgebildet.

Folgende Fräsparemeter wurden im Schrapp-Prozess verwendet:

Vorschubgeschwindigkeit v_f : 9000 mm/min
Drehzahl des Fräfers n : 7000 U/min
Arbeitseingriff a_e : 140 mm
Schnittbreite (Zustellung) a_p : 25 mm
Zeitspanvolumen Q : 1,22 m³/h



Abbildung 5-20: Schaftfräser $d=50$ mm, 15 0mm Schneidenhöhe, acht Schneiden

Durch die Wahl des größeren Fräfers konnte das Zeitspanvolumen im Schrapp-Prozess um das 5-Fache von 0,244 m³/h (5.1.2) auf 1,22 m³/h gesteigert werden. Das Zeitspanvolumen im Schlicht-Prozess bleibt durch die Wahl des gleichen Fräfers und identischer Fräsparemeter unverändert. Es wurde mit der Zerspanung der beiden oberen Hälften der Wachsschalung (Abbildung 5-18 - Nr.1, 1.1-1.2) begonnen. Hierzu wurden folgende Wachsrohlinge bearbeitet.

- Wachsrohling Nr.1, der beim Großpressversuch aus Kapitel 5.5 übriggeblieben war und aus Spänen mit einem Größtkorn von 2,0 mm und bei 20 °C hergestellt wurde

- Wachsrohling Nr. 2, der, wie zuvor beschrieben, bei 8 °C aus zuvor gepressten und wieder zerspannten Spänen hergestellt wurde

In Abbildung 5-21 ist das Ergebnis der beiden Wachschalungsmodule nach dem Schrupp- und Schlicht-Prozess dargestellt.

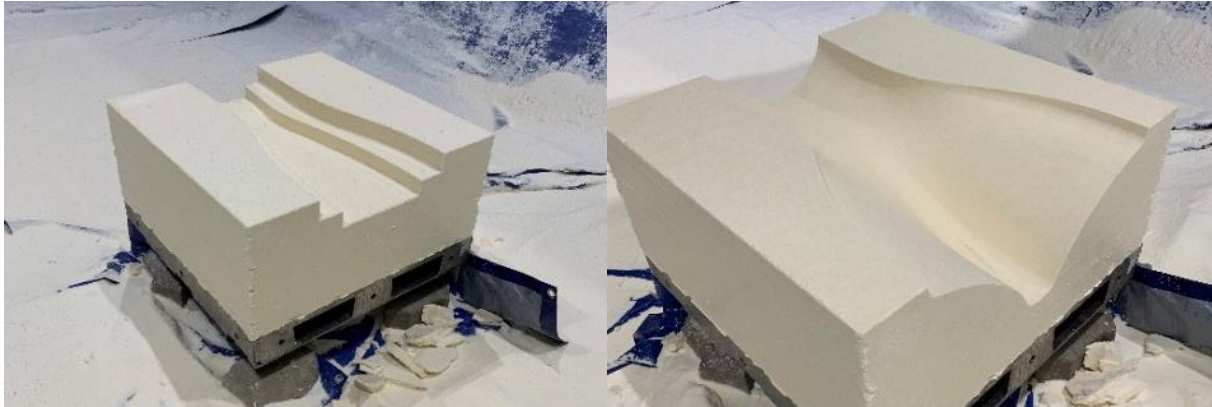


Abbildung 5-21: Fräsergebnis nach dem Schrupp-Prozess; Fräsergebnis nach dem Schlichtprozess – Wachsrohling Nr.1 (v. l. n. r.)

Alle Flächen sind haptisch glatt und nur wenige, jedoch für die herzustellende Geometrie nicht relevante Abplatzungen an den senkrechten Kanten des Quaders sind zu sehen.

Im nächsten Schritt sollten die zwei mittleren Schalungshälften (Abbildung 5-18 – Nr.1, 1.3-1.4) zerspannt werden. Hierzu wurden für beide Schalungshälften jene Rohlinge (Wachsrohling-Nr. 3 und 4) benutzt, die bei 8 °C und mit Wachsspänen hergestellt wurden. In Abbildung 5-22 ist das Ergebnis des zweiten Fräs-Jobs dargestellt.



Abbildung 5-22: Fräsergebnis nach dem Schrupp-Prozess; Fräsergebnis nach dem Schlichtprozess – Wachsrohling Nr.3 (v. l. n. r.)

Auf diesen Bildern ist zu erkennen, dass die Festigkeiten der Wachsrohlinge Nr. 3 und 4 (Abbildung 5-22) für eine effiziente spanende Bearbeitung nicht ausreichen. Es kommt zu erheblichen Abplatzungen/Ausrissen im Material. Der Grund, wieso die ersten beiden Schalungsmodule (Abbildung 5-21) ohne Probleme hergestellt werden konnten, ist zum einen, dass Rohling Nr. 1 bei 20 °C gepresst wurde, und zum anderen, dass Nr. 2 zwar bei 8 °C produziert wurde, jedoch im Vergleich zu den restlichen Stücken Nr. 3 bis 6 aus mehrfach zerspannten und wieder gepressten Spänen besteht. Dieser Umstand ist ggfls. in weiteren Versuchen zu klären. Da zu diesem Zeitpunkt lediglich sechs Wachsschalungsrohlinge vorhanden waren und durch den zweiten Fräs-Job zwei der sechs unbrauchbar wurden, konnten aufgrund des Zeitdrucks im Forschungsprojekt keine weiteren Wachsschalungsrohlinge gepresst werden. Um das Projekt dennoch fristgerecht abzuschließen, wurde festgelegt, aus den zwei erfolgreich hergestellten Wachsschalungsmodulen (Abbildung 5-21) das obere

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

geometrisch komplexere Drittel der Betonstütze (Stützenkopf) herzustellen und anhand dieses Stützenausschnittes die geplante Bilanzierung durchzuführen.

Die Oberflächen beider Wachsschalungsmodule wurden mit dem Schalwachs GRACE Ciri LM-33 als Trennmittel eingestrichen. Für die Betonage wurde der selbstverdichtende hochfeste Feinstkornbeton Nanodur® der Firma Dyckerhoff verwendet. In Abbildung 5-23 sind der Aufbau der Schalung, die Betonage sowie das Ausschalen dargestellt.

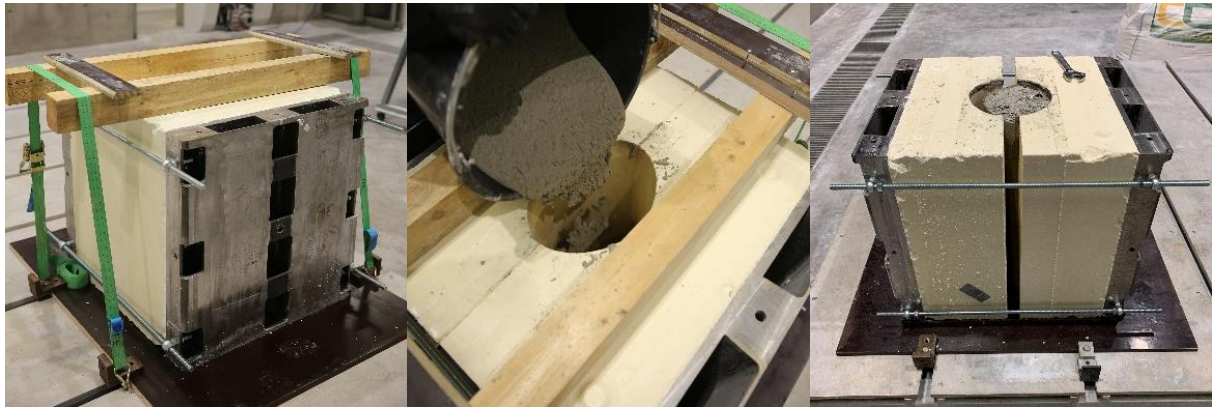


Abbildung 5-23: Montage der Schalung; Betonage der Schalung; Ausschalen des Stützenkopfes (v. l. n. r.)

Nach dem Ausschalen des Stützenkopfes wurde dieser zusammen mit einem Wachsschalungsmodul bei der Firma GOM GmbH vermessen und ein Soll-Ist-Abgleich (Maßanalyse) zwischen dem CAD-Modell und den digitalen Messdaten wurde erstellt. In Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25 sind das gebrauchte Wachsschalungsmodul, der Stützenkopf aus Beton sowie die zwei Soll-Ist-Vergleiche des Stützenkopfes und des Wachsschalungsmoduls abgebildet.

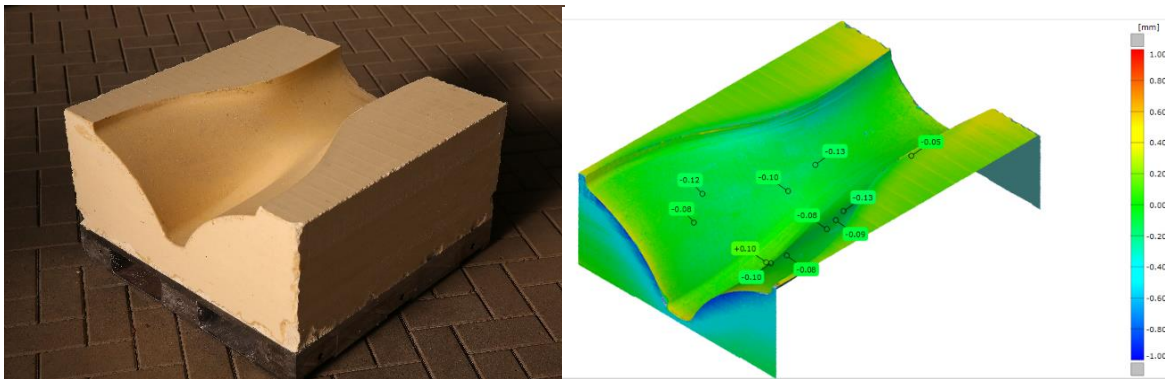


Abbildung 5-24: Wachsschalungsmodul nach der Entschalung; Soll-Ist-Abgleich (v. l. n. r.)

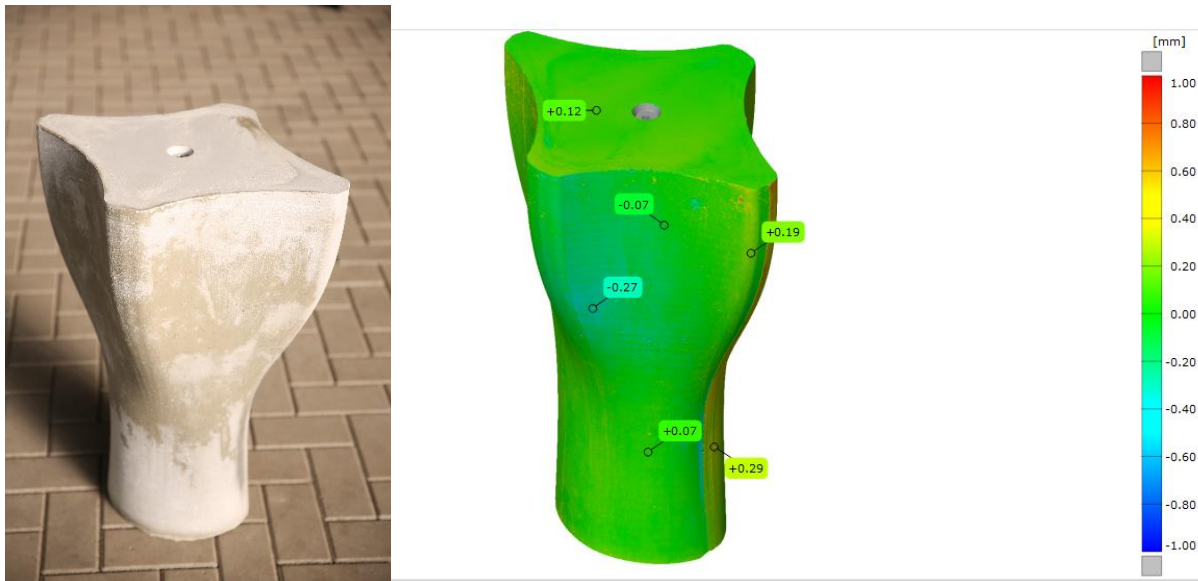


Abbildung 5-25: Hergestellter Stützenkopf; Soll-Ist-Abgleich des Stützenkopfes (v. l. n. r.)

Anhand von Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25 wird die erreichte hohe Maßhaltigkeit deutlich. Die Wachsschalung erreicht im Mittel eine Maßhaltigkeit von $\pm 0,1$ mm. Der mit Beton abgeformte Stützenkopf erreicht eine Maßhaltigkeit, die im Bereich von $\pm 0,3$ mm liegt. Durch das Schwinden des Betons sinkt die Maßhaltigkeit des hergestellten Stützenkopfes im Vergleich zum Wachsschalungsmodul. Jedoch ist festzuhalten, dass trotz des Schwindens die erreichte Maßhaltigkeit des Stützenkopfes für den Hochbau mehr als ausreicht.

5.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Verfahrens

Für das zu erforschende Fertigungsverfahren für Wachsschalungen ist, neben erreichten Zielen wie Genauigkeit, Recycelfähigkeit und Materialfestigkeit die Wirtschaftlichkeit ein weiteres Ziel. Es muss bezüglich Wirtschaftlichkeit mit anderen am Markt verfügbaren Verfahren wie z. B. Einwegschalungen auf Basis von EPS vergleichbar sein. Um diese ökonomische Bilanzierung durchführen zu können, werden die Produktionskosten für die Herstellung eines Wachsschalungsmoduls mit den Produktionskosten für die Herstellung des gleichen Schalungskörpers aus handelsüblichen, in Standardprozessen am Markt verfügbaren EPS-Schalungen verglichen. Da in dem zu erforschenden Fertigungsverfahren das Wachs zu annähernd 100 % recycelt wird, fallen die Investitionskosten für den Kauf des Wachses nur einmalig an. Das Wachs wird jedoch aufgrund von etwaigen Verunreinigungen über seine geplanten Nutzungszyklen (bis dato im Projekt jedoch nicht messbar) für eine 100-fache Wiederverwendung monetär angesetzt. Für die Berechnung wurden die Leistungen (kWh) der einzelnen Maschinen im Prozess gemessen. Die Preise der Ausgangsmaterialien wurden direkt vom Hersteller abgefragt. Ein Wachsschalungsrohling, der als Grundlage für den Vergleich verwendet wird, hat eine Höhe von rund 350 mm und einen Durchmesser von 1000 mm. Das ergibt ein Volumen von $0,275 \text{ m}^3$. Der durchschnittliche Strompreis in Deutschland betrug $0,294 \text{ €/kWh}$ (brutto) im Jahr 2018 und wurde als Basis für diese Berechnung herangezogen. Um eine vollständige Wirtschaftlichkeitsberechnung darzustellen, welche einen fairen Vergleich zu anderen am Markt verfügbaren Systemen ermöglicht, werden die Investitionskosten für die benötigten Maschinen in dieser Berechnung mit einbezogen. Grundlage für die Investitionskosten ist eine erste Preisschätzung für die benötigten Maschinen durch die Kooperationsfirma B+S. Um die Investitionskosten auf die Herstellung eines Schalungsmoduls umzulegen, wird eine Nutzungsdauer/Abschreibungsdauer von 10 Jahre sowie die Einsatzstunden pro Jahr auf $220 \text{ Tage} \times 8 \text{ Stunden} = 1760 \text{ h}$ festgelegt (Umlage der Investitionskosten auf 17600h). Durch Steigerung der Arbeitsstunden pro Tag (mehrere Schichten pro Tag) können die Herstellkosten für ein Schalungsmodul deutlich positiv beeinflusst werden.

5. Verifizierung der automatisierten Fertigung von individuellen Betonbauteilen anhand unterschiedlicher Demonstrationsbeispiele

Das Fertigungsverfahren teilt sich in folge Hauptkostenpunkte auf:

1. Kauf des ConFormWax in Form von Wachspellets

Bei einem Preis von ca. 4951,00 €/m³ -> 1361,53 €, 100-fach recycelt -> 13,61 €

2. Mahlen der Wachspellets zu Spänen/Pulver

Mahlleistung: 300kg/h -> 1,15 Module / Stunde

Kauf der Mühle 50.000€ / (17600h x 1,15) -> 2,47 €

Die Prallmühle hat eine Leistung von 5,5 kWh/t -> 1,44 kWh x 0,29 €/kWh -> 0,42 €

3. Pressen von Spänen/Pulver zu einem Wachsschalungsrohling

Pressleistung: 4 Module / Stunde

Kauf der Presse 500.000€ / (17600h x 4) -> 7,10 €

Die Presse hat eine Hydraulikpumpenleistung von 15 kWh.

Der Pressvorgang dauert ca. 15 min; 15 kWh x 0,25 h x 0,29 €/kWh -> 1,09 €

4. Fräsbearbeitung

Fräslleistung: 40min für ein Modul = 1,5 Stk. / Stunde

Kauf Roboter incl. Frässpindel + Einhausung 410.000€ / (17600h x 1,5) -> 15,53 €

Der Roboter incl. Frässpindel hat eine maximale Leistung von 60 kWh.

Es wird angenommen, dass der Roboter incl. Frässpindel

im Schnitt mit 50% der Maximalleistung läuft.

Die Bearbeitungsdauer beträgt ca. 40min = 0,67 Std.

60 kWh x 0,5 x 0,67 h x 0,29 €/kWh -> 5,83 €

5. Recycling-Prozess

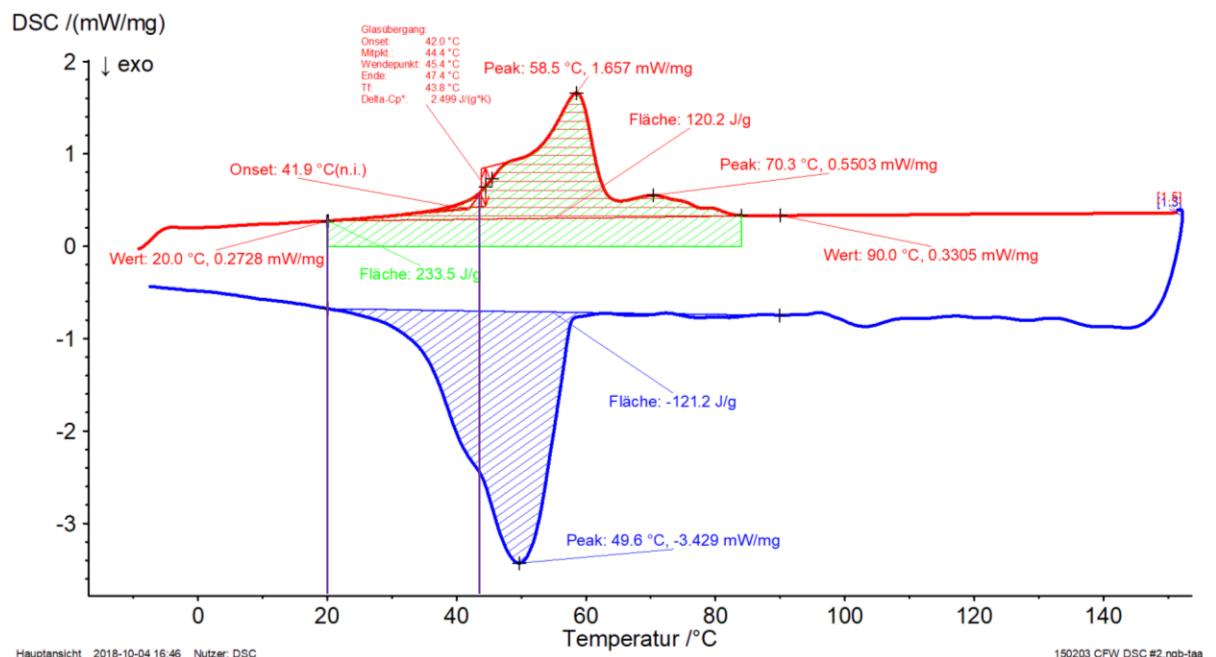
Mahlleistung: 1000kg/h -> 3,83 Module / Stunde

Kauf der Mühle 65.000€ / (17600h x 3,83) -> 0,96 €

Die Hammermühle hat eine Leistung 2,56 kWh/t -> 0,67 kWh x 0,29 €/kWh -> 0,19 €

In Summe ergeben sich Kosten von 47,20 € (brutto) für die Herstellung eines freigeformten Wachsschalungsmoduls (mit den gewählten Referenzabmessungen von 700x700x350 mm) inklusive des Recyclingprozesses.

Sind die Anforderungen an die Qualität des Wachsblockes höher, muss das Wachs zum Erreichen höherer Festigkeiten vor dem Pressprozess auf 40 °C temperiert werden. Die Kosten für diese Erwärmungsenergie sind zusätzlich zu berücksichtigen.



Basierend auf der spezifischen Wärmeenergie des Waxes lassen sich die dafür notwendige Energie bzw. die daraus resultierenden Kosten anhand einer am CFW-Wachs durchgeführten DSC-Messung (dynamische Differenzkalorimetrie Abbildung 5-26) bestimmen. Durch Integration der Fläche unterhalb der oberen roten Linie bei Temperaturen zwischen 20 °C und 42 °C ergibt sich die Energie, die benötigt wird, um das Wachs je Gramm von 20 °C auf 42 °C zu erwärmen. Diese Energie beträgt 60,36 J/g und liegt damit unter der Energie von 233,5 J/g, die benötigt wird, um das Wachs einzuschmelzen. Umgerechnet auf die elektrische Energie (kWh) und bezogen auf 1 m³ gepressten Waxes ergeben sich daraus 15,93 kWh/m³. Um den herzustellenden Wachsschalungsrohling von 20 °C auf 42 °C zu erwärmen, wird eine Energie von 4,38 kWh benötigt. Daraus entstehen Kosten von 1,26 €. Somit erhöht sich der Herstellungspreis für den zuvor genannten Wachsschalungsrohling von 47,20 € auf 48,46 € (brutto). Alternativ könnte auch Abwärme von vorhandenen Anlagen verwendet werden, um das Wachs zu erwärmen.

Im Vergleich dazu unterteilt sich das am Markt derzeit übliche Verfahren zur Herstellung von Freiformbetonbauteilen auf Basis von EPS (expandiertes Polystyrol) in folgende Kostenpunkte. Im Kauf- sowie Entsorgungspreis des EPS wird vorausgesetzt, dass die dafür notwendigen Maschinen und damit einhergehenden Abschreibungskosten schon im Kauf- bzw. Entsorgungspreis inkludiert sind.

1. Kauf von EPS

EPS 040 kostet laut Hersteller (z. B. Fa. Schurg) 80 €/m³
80 €/m³ x 0,275 m³ -> 22,00 €

2. Fräsbearbeitung

Fräsleistung: 25min für ein Modul = 2,4 Stk. / Stunde
Kauf Roboter incl. Frässpindel + Einhausung 410.000€ / (17600h x 2,4) -> 9,71 €
Der Roboter incl. Frässpindel hat eine maximale Leistung von 60 kWh.
Es wird angenommen, dass der Roboter incl. Frässpindel
im Schnitt mit 10% der Maximalleistung läuft.
Die Bearbeitungsdauer beträgt ca. 25min = 0,42 Std.
60 kWh x 0,1 x 0,42 h x 0,29 €/kWh -> 0,73 €

3. Entsorgung

Laut Hersteller liegen die Kosten für die Entsorgung des mit Trennmittel verunreinigten EPS ungefähr im Bereich des Kaufpreises von EPS 040 (80 €/m³)
80 €/m³ x 0,275 m³ -> 22,00 €

In Summe ergeben sich Kosten von rund 54,44 € für die Herstellung eines freigeformten Schalungselements aus EPS 040.

Da die Herstellung der Ausgangsmaterialien (EPS Block und Wachsschalungsrohling) voll automatisiert ablaufen können und nach dem Fräsprozess die gleichen zum Teil händischen Arbeiten, wie Trennmittelauftrag, Zusammenbau der Schalung und Ausschalen des Betonbauteils, in beiden Verfahren gleichermaßen anfallen, bleiben in diesem wirtschaftlichen Vergleich die Lohnkosten für beide Verfahren unberücksichtigt. Diese Annahme hat somit keine einseitige negative Auswirkung auf die Gesamtwirtschaftlichkeit des jeweiligen Verfahrens zur Folge.

Durch diese überschlägige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird deutlich, dass die Kosten von 48,46 € für eine Wachsschalung unter denen einer herkömmlichen EPS-Schalung liegen und dies voraussichtlich auch bei einer genaueren Betrachtung der Fall sein wird.

Unberücksichtigt bleiben in dieser Betrachtung positive Nebeneffekte, wie die Einsparung von Abfall und die mit den Wachsschalungen erreichbare bessere Oberflächengüte und Maßhaltigkeit sowie bessere Materialfestigkeiten.

6 Zusammenfassung, Ausblick und Empfehlung

6.1 Zusammenfassung

Im Zeitalter von *Industrie 4.0* und *Smart-Factory* herrschen im Bauwesen noch zum Teil stark veraltete, rudimentäre und meist händische Herstellungsmethoden für Bauteilen aus Beton vor. Mit Hilfe digitaler Entwurfs- und Berechnungssoftware sind Architekten und Ingenieure seit einigen Jahren in der Lage, hochkomplexe, freigeformte und optimierte Bauteilgeometrien zu planen. Diese komplizierten geometrischen Bauteile können bis dato lediglich mittels teurer Einweg-Sonderschalungen hergestellt werden und verursachten im gleichen Zug hohe Mengen an Produktionsabfall. Verhältnismäßig günstiger Beton wird aufgrund von hohen Schalungs- und Personalkosten heutzutage oft in einfache, vorwiegend rechteckige oder runde Standardschalungen gegossen. Aus diesem Grund wird mehr Beton verbraucht als für die eigentliche Bauaufgabe notwendig ist.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, wirtschaftliche Effizienz und ökologische Nachhaltigkeit im Schalungsbau für einen frei geformten Betonbau zusammenzuführen, um so der Bauwirtschaft eine möglichst wirtschaftliche Herstellungsmethode für solche Betonbauteile zur Verfügung zu stellen. Mit den erzielten Forschungsergebnissen, welche in den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit beschrieben sind, können diese gesteckten Ziele erreicht werden. Mit der **Wachsschalungstechnologie für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen** ist es somit in Zukunft möglich, wirtschaftlich effiziente und ökologisch nachhaltige Freiformschalung auf Basis von technischen Wachsen in einem individuellen und hochgradig automatisierten Prozess herzustellen. Es wurde der gesamte Fertigungsprozess im Rahmen dieser Arbeit erforscht. Im Folgenden werden die Ergebnisse der erforschten Prozessschritte kurz zusammengefasst:

Pressen von Wachsspänen

Die in Kapitel 4.2 beschriebenen Untersuchungen haben ergeben, dass sich mit optimierten Pressparameter Wachs Blöcke mit einer Druckfestigkeit herstellen lassen, die mit den Druckfestigkeiten von Wachs Blöcken aus gegossenem Wachs vergleichbar sind.

Grundlegend wirkt sich eine Erhöhung der Temperaturen und der Presskraft positiv auf die daraus resultierende Druckfestigkeit der hergestellten Prüfkörper bzw. Wachsrohlingen aus. Hierbei hat die Erhöhung der Temperatur, im Vergleich zur Steigerung der Presskraft, einen deutlich größeren Einfluss auf die Druckfestigkeit. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass sich folgende Pressparameter für das verwendete ConFormWachs als optimales einordnen lassen:

- Temperatur der Späne vor dem Pressprozess 40°C
- Presskraft/-spannung von 6,4N/mm²

Eine weitere Steigerung der Pressparameter über diese Werte hinaus hat keinen positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit.

Durch den Einsatz von Zusatzstoffen im Wachs, speziell Kalksteinmehl, konnte in Versuchen gezeigt werden, dass diese die Druckfestigkeit um ca. 70% erhöhen können. Ebenfalls reduzieren sie die Kriechverformungen.

Zerspannung von gepressten Wachskörpern

Kleinmaßstäbliche Zerspanungsversuche haben gezeigt, dass sich komplexe Geometrien aus gepressten Wachsböcken in nahezu gleicher Qualität wie aus gegossenen Wachsböcken herstellen lassen. Ähnliches konnte bei den großmaßstäblichen Zerspanungsversuchen der Wachsböcke für die Demonstrationsbeispiele gezeigt werden. Die Maßhaltigkeit der Wachsschalung, sowie die damit hergestellten Betonbauteile lag im Zehntelmillimeter Bereich und ist somit für den Einsatz im Hoch- und Tiefbau mehr als zufriedenstellend zu bewerten.

Durch die eingesetzten Fräswerkzeuge und auf das gepresste Wachs abgestimmte Fräsparameter ist eine effiziente und hochgenaue Bearbeitung der Wachsschalungsmodule möglich. Hieraus abgeleitete Empfehlungen für Fräswerkzeuge mit größeren Abmessungen ermöglichen es in Zukunft das Zeitspannvolumen speziell im Schrubb-Prozess weiter zu erhöhen, welches die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens nochmals steigern kann.

Verbindungsmittel im Wachs

Anhand von Untersuchungen verschiedener Verbindungsmittel konnte gezeigt werden, dass sich speziell Holzbauschrauben und Rampa-Muffen verschiedener Größen hervorragend für den Einsatz in gepressten Wachskörpern eignen. Die erforschte Verbindungstechnik ermöglicht es in Zukunft, Wachsrohlinge kraftschlüssig und reversibel an den SVE-Trägereinheiten oder Standard-Schalungssystemen zu befestigen.

Betonage der Wachsschalung

Anhand der hergestellten Demonstratoren konnte gezeigt werden, dass die Wahl der Betonsorte (Normalbeton, Ultra-Hochfester-Feinstkornbeton) keinen nachweisbaren Einfluss auf die Wachsschalung hat. Durch den Gebrauch des Trennmittels GRACE Ciri LM-33 konnte selbst freigeformte Betonbauteile einfach ausgeschalt werden, ohne das Wachs am Beton oder Beton am Wachs haften blieb. Kurze Ausschalzeiten, speziell bei Innenschalungen, sollten berücksichtigt werden.

Recycling-Prozess

Die mit Unterstützung der Firma Jehmlich durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass es in Zukunft möglich ist, zum einen das Ausgangsmaterial in Form von Wachspellets zu pressbaren Spänen/Pulver zu mahlen und zum anderen die gebrauchten Wachsschalungsmodule zu 100% durch geeignete Mahlverfahren in deren Ausgangsform (pressbare Wachsspäne/-pulver) zurückzuführen.

Der Mahlprozess ist schnell, wirtschaftlich und produziert homogen Späne, welche sich ohne Verlust in den Pressprozess zurückführen lassen. Lediglich bei hohen Raumtemperaturen über 20°C ist darauf zu achten, dass die Mühlen nicht durch das Wachs verklebt werden. Sollte dies der Fall sein, wird empfohlen kalte CO₂-Pellets dem Mahlgut zuzuführen, um das Mahlgut während des Mahlprozesses zu kühlen.

Die Vermeidung von Verschmutzungen der Wachsspäne zur Sicherstellung einer hohen Wiederverwendbarkeit des Schalungsmaterials ist von großer Bedeutung für das Verfahren. Die gesamte Produktionskette ist daher in sauberen und abgeschlossenen Räumlichkeiten vorzusehen.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Herstellungskosten eines freigeformten Wachsschalungsmoduls inklusive des Recyclingprozesses des Wachses unter denen von herkömmlichen EPS 040 „Einweg Schalungen“ liegen. Aus ökonomischer Sicht ist das erforschte Fertigungsverfahren somit als exzellente Alternative besonders zu diesem gängigen, sowie den anderen am Markt erhältlichen Freiformschalungs- bzw. Sonderschalungssystemen anzusehen. Das verwendete ConFormWax besitzt zudem wesentlich höhere Festigkeiten gegenüber EPS, wodurch speziell bei Hochbauschalungen mit erhöhten Frischbetondrücken die Maßhaltigkeit der herzustellenden Betonbauteile erhöht werden kann. Durch den angewendeten Closed-Loop-Recycling-Prozess produziert das Verfahren keinerlei Abfall und besitzt hierdurch ein in Zukunft relevanter werdendes ökologisches Alleinstellungsmerkmal auf dem Markt der Sonderschalungssysteme.

6.2 Ausblick und Empfehlungen für weitere Anwendungen

Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche haben gezeigt, dass sich ConFormWax (CFW) hervorragend für den hier beschriebenen Herstellungsprozess von Wachrohrlingen, mittels Pressen von Spänen zu Blöcken eignet. Keine der notwendigen Teilprozesse stellt in Zukunft eine Schwierigkeit dar.

Einige Versuchsreihen, wie der Einsatz von Zusatzstoffen, zeigen vielversprechende Ansätze für weiterführende Untersuchungen, die zeitlich bedingt im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt werden konnten. Da in dieser kurzen Versuchsreihe zwar eine hohe Steigerung der Druckfestigkeit erreicht werden konnte, aber nur wenige Zusatzstoffe in Verbindung mit einer geringen Anzahl verschiedener Mischungsverhältnisse untersucht werden konnten, sieht der Autor ein hohes Potential, durch den Einsatz von Zusatzstoffen das Wachs zum einen robuster und widerstandsfähig und zum anderen deutlich günstiger zu machen.

Auch die Untersuchungen geeigneter Verbindungsmittel im Wachs können hinsichtlich weiterer zielführender Verbindungsmittel ergänzen und mittels normgerechter Versuchsdurchführung auf die exakte Zugfestigkeit der einzelnen Verbindungsmittel im Wachs überprüfen werden.

Aus wirtschaftlicher Sicht liegt der in dieser Arbeit beschriebene Herstellprozess preislich unter der derzeit am Markt zum Einsatz kommenden EPS Schalung. Trotzdem kann festgehalten werden, dass durch die kurze Projektlaufzeit der gesamte Zerspanungsprozess nur oberflächlich betrachtet und untersucht werden konnte. Da das Zerspanen von großvolumigen Körpern durchaus als Randgebiet in der Zerspanungsindustrie betrachtet werden kann, muss derzeit auf Standard-Fräswerkzeuge zurückgegriffen werden. In Zukunft können, speziell für das Zerspanen großformatiger Wachskörper, Fräswerkzeuge entwickelt werden, welche eine deutlich schnellere Bearbeitung des Wachrohrlings ermöglichen, was sich wiederum positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtverfahrens auswirkt. Nur mit Hilfe eines günstigen, schnellen und präzisen Herstellungsprozesses für in Serie gefertigte Unikate besteht in Zukunft die Möglichkeit mit am Markt akzeptierten und funktionierenden Herstellungsprozessen für Betonbauteile zu konkurrieren und von diesen abzuheben.

Die Firma B+S hat nach Ende des Förderzeitraums des Forschungsprojekts den Herstellungsprozess stetig weiterentwickelt. Durch die Optimierung der Fräsbahnplanung, den Fräsparametern und den Einsatz eines Industrie-Fräsroboters, konnte die B+S anhand zweier Demonstratoren zeigen, dass die Herstellungszeit weiter verringert werden konnte.

Es wurde ein zweiter Schachtsammler hergestellt (Abbildung 6-1). Der gesamte robotische Zerspanungsprozess dauert laut B+S rund 40min (vgl. 5.3.3). Die Bearbeitungszeit des leicht komplexeren Demonstrationsbeispiel in Kapitel 5.2 dauerte ca. 140min. Durch die Optimierung der Fräsparametern kann somit die Bearbeitungszeit um ca. 70% reduziert werden. Durch den Einsatz eines Vakuumsystems konnte die Wachsschalung komplett und intakt ausgebaut werden.

Durch eine vollständige automatisierte Vorfertigung von Betonbauteilen im Werk und reine Montage vor Ort, ähnlich zum Stahlbau, muss in Zukunft darüber nachgedacht werden, das gesamte Sicherheitskonzept im Betonbau für solche Bauteile kritisch zu hinterfragen und ggfls. anzupassen, da der Unsicherheitsfaktor Mensch auf der Baustelle fast komplett eliminiert werden kann. Hieraus ergeben sich z. B. Materialeinsparungen was sich wiederum auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.



Abbildung 6-1: Entschalung des Schachtsammlers mit Hilfe von Vakuumtechnik; hergestellter Schachtsammler; Nahaufnahme der erreichten Oberflächenqualität des Schachtsammlers; Entschalte und intakte Wachsschalung (v. l. n. r.) (Fotos © B+S Engineering GmbH)

Zudem wurden die in 5.3 zerstörten Wachsschalungsmodule von B+S ein weiteres Mal produziert und im Anschluss die Gesamtschalung zur Herstellung des Demonstrators in Kapitel 5.3 samt integrierter Bewehrung zusammengebaut und ausbetoniert. In Abbildung 6-2 ist der Herstellungsprozess abgebildet. Hier ist anzumerken, dass die beiden oberen Schalungsmodule, welche zur Herstellung des Stützkopfs benötigt wurden, die gebrauchten Schalungsmodule aus Kapitel 5.3 waren und ein zweites Mal als Schalung zum Einsatz kamen. Somit konnte gezeigt werden, dass eine Wiederverwendung der Schalung zur Herstellung gleicher Bauteilgeometrien möglich ist. Die hergestellte freigeformte Stützen (vgl. Abbildung 5-10 Nr.5) wurde auf der Bauma 2019 auf dem Messestand der B+S Engineering GmbH zusammen mit einem Schalungsmodul ausgestellt.

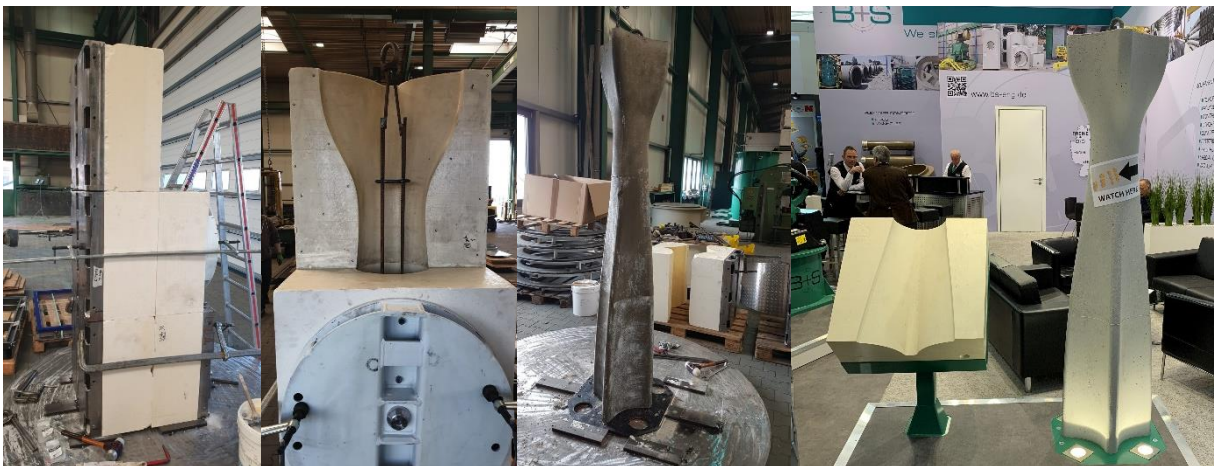


Abbildung 6-2: Zusammenbau der Schalungsmodule; Integration der Stahlbewehrung; Ausgeschaltete freigeformte Stahlbetonstütze; Messestand mit Ausstellung der Stahlbetonstütze rechts und einem Schalungsmodul links (v. l. n. r.) (Fotos © B+S Engineering GmbH)

7 Quellenverzeichnis

7.1 Literatur

- [1] Roland Berger GmbH, *Digitalisierung der Bauwirtschaft: Der europäische Weg zu "Construction 4.0"*.
- [2] T. Faust, *Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin: Ernst & Sohn, 2003.
- [3] M. Schlaich und M. El Zareef, „Infraleichtbeton“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Nr. 103, S. 175–182, 2008.
- [4] M. Schmidt *et al.*, Hg., *Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton*, 1. Aufl. Berlin: Beuth, 2008.
- [5] W. Brameshuber, *Selbstverdichtender Beton*. Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 2004.
- [6] H. Kloft und S. Hoyer, „Zum Entwerfen von Tragwerken“, *Stahlbau*, 83-11, S. 806–814, 2014.
- [7] Wikipedia, *Zement*. [Online] Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zement>. Zugriff am: 18. April 2019.
- [8] International Air Transport Association, *Fact Sheet - Climate Change & CORSIA*. [Online] Verfügbar unter: https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/fact-sheet-climate-change.pdf. Zugriff am: 18. April 2019.
- [9] J. Mainka, „Non-Waste-Wachsschalungen: Entwicklung einer Non-Waste-Wachsschalungstechnologie für freigeformte, geometrisch komplexe Betonbauteile auf Basis 100% recycelbarer technischer Wachse“. Dissertation, Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig, Braunschweig, 2018.
- [10] TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf, *ConFormWax*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.conformwax.com/>. Zugriff am: 15. April 2018.
- [11] B+S Engineering GmbH, <http://www.bs-eng.de/>. [Online] Verfügbar unter: <http://www.bs-eng.de/>. Zugriff am: 23. April 2019.
- [12] *Toleranzen im Hochbau*, DIN 18202, 2018-12-00.
- [13] F. H. Hoffmann, *Schalungstechnik mit System: Bewährte Methoden, neue Entwicklungen*. Wiesbaden, Berlin: Bauverl., 1993.
- [14] A. K. Behringer und F. Rek, *Das Maurerbuch : Ein Fachbuch f. Geselle, Polier u. Meister. Ein Buch d. Praxis f. Baumeister, Architekten u. Lehrer*, 9. Aufl. Ravensburg: O. Maier, 1959.
- [15] M. Sauter, Hg., *Computergestützte Produktion von Freiformen in der Architektur: CAM of freeforms in architecture*. Petersberg: Imhof, 2008.
- [16] Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Goetheanum>. [Online] Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Goetheanum>. Zugriff am: 21. Mai 2019.
- [17] W. Führer, J. Hegger und M. Molter, Hg., *Vom Baukasten zum intelligenten System: Individuelles Bauen durch Vorfertigung ; Tagungsband, RWTH Aachen, 10.10.2000 - 11.10.2000*. Herstellung frei geformter Stahlbetonfertigteile am Beispiel 'Der neue Zollhof in Duesseldorf'. 1. Aufl. Aachen: Eigenverl., 2000.
- [18] W. Meyer-Bohe, „Geschichte der Vorfertigung“, *Zentralblatt für Industriebau*, Nr. 5, S. 186–191, 1972.
- [19] Le Corbusier-Saugnier, *Vers une architecture*. Paris, 1925.

- [20] Deutsche Geschichte in Dokumenten und Bildern, http://ghdi.ghi-dc.org/sub_image.cfm?image_id=140&language=german. [Online] Verfügbar unter: http://ghdi.ghi-dc.org/sub_image.cfm?image_id=140&language=german. Zugriff am: 21. Mai 2019.
- [21] WBM Wohnungsbaugesellschaft Berlin-Mitte mbH, <https://www.jeder-qm-du.de/ueber-die-platte/detail/platz-der-vereinten-nationen>. [Online] Verfügbar unter: <https://www.jeder-qm-du.de/ueber-die-platte/detail/platz-der-vereinten-nationen>. Zugriff am: 21. Mai 2019.
- [22] H. Kuch, J.-H. Schwabe und U. Palzer, *Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen: Verfahren und Ausrüstungen*, 1. Aufl. s.l.: Verlag Bau+Technik, 2015.
- [23] Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Elementdecke>. [Online] Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Elementdecke>. Zugriff am: 21. Mai 2019.
- [24] Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Dreifachwand>. [Online] Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Dreifachwand>. Zugriff am: 21. Mai 2019.
- [25] BWH Betonwerk-Holdorf GmbH & Co. KG, <https://www.bwh-holdorf.de/elementwaende>. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bwh-holdorf.de/elementwaende>. Zugriff am: 21. Mai 2019.
- [26] F. Blume und R. Krömer, Hg., *Beton + Fertigteil-Jahrbuch 2002*. Wiesbaden: Bauverlag, 2002.
- [27] PERI GmbH, <https://www.peri.de/projekte/wohn-und-geschossbau/der-neue-zollhof-deutschland.html>. [Online] Verfügbar unter: <https://www.peri.de/projekte/wohn-und-geschossbau/der-neue-zollhof-deutschland.html>. Zugriff am: 27. Mai 2019.
- [28] Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Neuer_Zollhof. [Online] Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Neuer_Zollhof. Zugriff am: 25. Mai 2019.
- [29] PERI GmbH, „Kühne Formen und außergewöhnliche Sichtbetonqualität“, PERI GmbH, 2012.
- [30] *DIN EN 1992-1-1/ NA: Nationaler Anhang: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*, DIN EN 1992-1-1/ NA, 2013-04-00; + A1:2015-12-00.
- [31] *DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton*, DIN 1045-2, 2008-08-00.
- [32] *DIN EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*, DIN EN 1992-1-1 Eurocode 2, 2011-01-00.
- [33] BFS Betonfertigteilesysteme GmbH, https://hp-bfs.de/pdf/hp-bfs_prospekt_capitan_2019_D_EN_web.pdf. [Online] Verfügbar unter: https://hp-bfs.de/pdf/hp-bfs_prospekt_capitan_2019_D_EN_web.pdf. Zugriff am: 25. Mai 2019.
- [34] BFS Betonfertigteilesysteme GmbH, <https://hp-bfs.de/produkte.php?product=capitan&category=betonschachtanlagen&productTitle=CAPITAN>. [Online] Verfügbar unter: <https://hp-bfs.de/produkte.php?product=capitan&category=betonschachtanlagen&productTitle=CAPITAN>. Zugriff am: 25. Mai 2019.
- [35] PRECO - ZNL P.V. Betonfertigteilterwerke GmbH, <http://www.preco.de/index.php/2015-02-06-22-16-05/schachtsanierung>. [Online] Verfügbar unter: <http://www.preco.de/index.php/2015-02-06-22-16-05/schachtsanierung>. Zugriff am: 25. Mai 2019.
- [36] Top-Werk GmbH - Prinzing-Pfeiffer, <https://www.topwerk.com/prinzing-pfeiffer/maschinenuebersicht/primuss/>. [Online] Verfügbar unter: <https://www.topwerk.com/prinzing-pfeiffer/maschinenuebersicht/primuss/>. Zugriff am: 25. Mai 2019.

- [37] G. Hamel und C. K. Prahalad, *Competing for the Future*. Boston: Harvard Business School Press, 1996.
- [38] Boenert, L., Bloemeke, M., „Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft“ in *Bauingenieur: Die richtungsweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen*, VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Hg., 2003, S. 227–283.
- [39] G. Girmscheid, *Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2: Operative Leistungserstellungs- und Supportprozesse*, 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [40] H. Bachmann, A. Steinle und V. Hahn, *Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [41] Institut für Bauforschung e.V., „Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenkosten: Gemeinschaftsprojekt vom Bauherren-Schutzbund e.V., der AIA AG und dem Institut für Bauforschung e.V.“, Hannover IFB – 14553, Feb. 2015. [Online] Verfügbar unter: https://www.bsb-ev.de/fileadmin/user_upload/Bauherren-Schutzbund/Aktuell/Studien/15_Forschungsbericht_IFB_Bauschaeden_und_Bauschadenkosten_2015.pdf. Zugriff am: 1. Juni 2019.
- [42] *Allgemeintoleranzen*, DIN ISO 2768 Teil 1, 1991-06-00.
- [43] *Allgemeine Regeln für Betonfertigteile*, DIN EN 13369, 2018-09-00.
- [44] K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, F. Rieg und R. Stelzer, Hg., *Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess: Tagungsband, 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014 : am 16. und 17. Oktober 2014 in Bayreuth*. Bayreuth: Universität Bayreuth Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, 2014.
- [45] Zweites Deutsches Fernsehen - Anstalt des öffentlichen Rechtes und Jan Woitas - dpa, <https://www.zdf.de/nachrichten/heute/deutsche-autoproduktion-weniger-fahrzeuge-gebaut-100.html>. [Online] Verfügbar unter: <https://www.zdf.de/nachrichten/heute/deutsche-autoproduktion-weniger-fahrzeuge-gebaut-100.html>. Zugriff am: 9. Juli 2019.
- [46] M. Berger, *Römp: Polymere*. [Online] Verfügbar unter: <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-16-03381>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [47] R. Hanselmann, *Römp: Makromoleküle*. [Online] Verfügbar unter: <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-13-00294>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [48] American Chemistry Council, *The Basics: Polymer Definition and Properties*. [Online] Verfügbar unter: <https://plastics.americanchemistry.com/plastics/The-Basics/>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [49] A. Lembens und S. Abels, „Von Knete, Polymeren, Makromolekülen und nichtnewtonschen Systemen“, *Plus Lucis*, S. 20–21, 2016.
- [50] G. Kickelbick, *Chemie für Ingenieure*. München: Pearson, 2008.
- [51] M. Rother, *Mediendatenbank TU Braunschweig: Polymere Einleitung*. [Online] Verfügbar unter: https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/agnespockelslab/download/polymere_einleitung.pdf. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [52] Reichelt Chemietechnik GmbH, *RCT: PE Polyethylen*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.rct-online.de/de/HmswGlossar/detail/id/14>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [53] T. Härtig, „Stoffübertragung beim Spritzgießen“. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, TU Chemnitz, Chemnitz, 2012.

-
- [54] W. Hellerich, G. Harsch und S. Haenle, *Werkstoff-Führer Kunststoffe*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1975.
- [55] Migrol AG, *Holzpellets-Herstellung*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.migrol.ch/de/holzpellets/informieren/herstellung.aspx>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [56] best: Pellets Handelsgemeinschaft GmbH, *Pellets Pelletherstellung*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.best-pellets.de/produktinfos/pelletherstellung.html>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [57] *Die Kork-Story*. Zürich, 2004.
- [58] Reichelt Chemietechnik GmbH, *RCT: Sintern*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.rct-online.de/magazin/sintern/>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [59] B. Froherz, *Aus dem Pressverhalten keramischer Arbeitsmassen abgeleitete konstruktive maschinentechnische Erfordernisse der Trocken- und Nasspresstechnik in der Technischen Keramik*. Freiberg: Bergakademie Freiberg, 1990.
- [60] K. H. Bauer und B. C. Lippold, *Pharmazeutische Technologie: Mit Einführung in die Biopharmazie ; [Lehrbuch] ; mit 91 Tabellen*, 9. Aufl. Stuttgart: Wiss. Verl.-Ges, 2012.
- [61] A. Fahr und R. Voigt, *Voigt pharmazeutische Technologie: Für Studium und Beruf ; mit 113 Tabellen*, 12. Aufl. Stuttgart: Deutscher Apotheker-Verlag, 2015.
- [62] R. Büll, *Das große Buch vom Wachs Band 2*. München: Verlag Georg D. W. Callwey, 1977.
- [63] Arthur Weissbach GmbH, *Weissbach Maschinen: Hochleistungspressen für Teelichte*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.weissbach-maschinen.com/de/index.php?doknr=m0405>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [64] E. Paucksch, S. Holsten, M. Linß und F. Tikal, *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien ; mit 45 Tabellen*, 12. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [65] *Fertigungsverfahren Spanen*, DIN 8589-3, 2003-09-00.
- [66] J. Dietrich, *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*, 12. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [67] *Fertigungsverfahren Spanen*, DIN 8589, 2003-09-00.
- [68] *Fertigungsverfahren*, DIN 8580, 2003-09-00.
- [69] *Schaftfräser mit Zylinderschaft*, DIN 844-1, 1989-04-00.
- [70] *Schaftfräser mit Zylinderschaft*, DIN 844-2, 1990-04-00.
- [71] *Maschinenwerkzeuge für Metall*, DIN 857, 1951-03-00.
- [72] *Werkzeug-Anwendungsgruppen*, DIN 1836, 1984-01-00.
- [73] *Walzenstirnfräser mit Quernut und Längsnut*, DIN 1880, 1993-11-00.
- [74] *Walzenstirnfräser mit Quernut, mit Schneidplatten aus Hartmetall*, DIN 8056, 1980-02-00.
- [75] Gühring KG, *Guehring Milling Tools*. [Online] Verfügbar unter: https://guehring.com/wp-content/uploads/2018/dokumente/Fraesen/Katalog_Fraeswerkzeuge_EN_2017_Internet.pdf. Zugriff am: 8. April 2019.

- [76] PERI GmbH, <https://www.peri.de/produkte/schalungssysteme/wandschalungen/domino-wandschalung.html>. [Online] Verfügbar unter: <https://www.peri.de/produkte/schalungssysteme/wandschalungen/domino-wandschalung.html>. Zugriff am: 27. Mai 2019.
- [77] InformationsZentrum Beton GmbH, <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/>. [Online] Verfügbar unter: <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/>. Zugriff am: 28. Mai 2019.
- [78] G. Henderson, „Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete“, Aug. 2006.
- [79] M. Schlaich und A. Hückler, „Infraleichtbeton. Reif für die Praxis.“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Dez. 2017.
- [80] *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016*, DIN EN 206, 2017-01-00.
- [81] *DAfStb-Richtlinie - Selbstverdichtender Beton*, 2012-09-00.
- [82] *Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen*, DIN 18218, 2010.
- [83] W. Malpricht, *Schalungsplanung: Ein Lehr- und Übungsbuch*, 1. Aufl. München: Fachbuch-Verl. Leipzig im Carl Hanser-Verl., 2010.
- [84] *Traggerüste - Anforderungen, Bemessung und Entwurf*, DIN EN 12812, 2008.
- [85] B. Freund, T. Proske und C.-A. Graubner, Hg., *Frischbetondruck bei geneigten Schalungen – Sachstandbericht*. 21. Kassel-Darmstädter Baubetriebsseminars Schalungstechnik, Gesellschaft für baubetriebliche Weiterbildung – Arbeitskreis Schalung, 2011.
- [86] Beuth Verlag GmbH, <https://baulexikon.beuth.de/HYDRATATION.HTM>. [Online] Verfügbar unter: <https://baulexikon.beuth.de/HYDRATATION.HTM>. Zugriff am: 29. Mai 2019.
- [87] T. Proske, „Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton: Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung“. Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 2007.
- [88] H. Rumpf, „Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft“, *Chemie Ing. Techn.*, Jg. 37, Nr. 3, S. 187–202, 1965.
- [89] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997.
- [90] C. J. Stairmand, „The Energy Efficiency of Milling Processes“ in *4. Europ. Symp. Zerkleinern*, Nürnberg, 1975.
- [91] Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, *BG Bau: Stoff-Verzeichnisse*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bgbau.de/themen/sicherheit-und-gesundheit/gefahrstoffe/sicherheitsdatenblatt/stoff-verzeichnisse/>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [92] R. Büll, *Das große Buch vom Wachs Band 1*. München: Verlag Georg D. W. Callwey, 1977.
- [93] Reichelt Chemietechnik GmbH, *RCT: EVA Ethylen-Vinylacetat-Copolymer*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.rct-online.de/de/HmswGlossar/detail/id/28>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [94] GTS German Trading Service GmbH, *Produktdatenblatt EVA Wachs*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.gts-hamburg.de/upload/15353442-Produktdatenblatt-EVA-Wachs.pdf>. Zugriff am: 16. Februar 2019.

- [95] H. Beyer, *Lehrbuch der organischen Chemie*. Leipzig: S. Hirzel Verlag, 1959.
- [96] U.S. National Library of Medicine, *ChemIDplus: Paraffin waxes (petroleum), hydrotreated*. [Online] Verfügbar unter: <https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/rn/64742-51-4>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [97] Sitterwerk, *Materialarchiv: Hartparaffin*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.materialarchiv.ch/app-tablet/#detail/1505>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [98] W. Caseri, *Römp: Polycyclopentadiene*. [Online] Verfügbar unter: <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-16-03176>. Zugriff am: 16. Februar 2019.
- [99] *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen*, EN 933-1:2012.
- [100] *Kunststoffe - Bestimmung von Druckeigenschaften*, EN ISO 604:2003.
- [101] *Prüfung von Festbeton*, EN 12390-1:2012.
- [102] H. Budelmann, *Baustoffkunde II für Bauingenieure, Wirtschaftsingenieure FR Bau, Umweltingenieure, Architekten*. Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz.
- [103] E. Stein, *Bachelorarbeit: Mechanische Eigenschaften von Technischen Wachsen für den Einsatz im freigeformten Betonschalungsbau*. Braunschweig, 2015.
- [104] *Kunststoffe - Bestimmung von Druckeigenschaften*, DIN EN ISO 604, 2003.
- [105] A. Majdič und O. Grewen, *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Studien zur Verdichtung feuerfester Massen auf Rüttelpressen*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1973.
- [106] H. Schreiner, *Pulvermetallurgie elektrischer Kontakte*. Berlin, Heidelberg, 1964.
- [107] *Prüfverfahren für Zement*, DIN EN 196-1:2016-11-00.
- [108] *Kunststoffe – Bestimmung der Härte*, EN ISO 2039-1:2003-02-00.
- [109] Kern GmbH, https://kern.de/de/technisches-datenblatt/polystyrol-ps?n=2101_1. [Online] Verfügbar unter: https://kern.de/de/technisches-datenblatt/polystyrol-ps?n=2101_1. Zugriff am: 26. Juni 2019.
- [110] H. Hertz, *Miscellaneous Papers*. New York: MacMillan and Co. Ltd, 1896.

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vor- und Nachteile der von Mainka entwickelten Non-Waste-Wachsschalungstechnologie.....	37
Tabelle 3-1: Definition des Drillwinkels und Maßangaben von Schafffräsworkzeugen [66, 69–71].....	45
Tabelle 3-2: am Markt verfügbare Walzenstirnfräser [66]	46
Tabelle 3-3: am Markt verfügbare Schafffräser [69, 70]	47
Tabelle 3-4: am Markt verfügbare Radiusfräser [75].....	47
Tabelle 3-5: resultierende Bearbeitungsparameter für Fräsworkzeuge mit bestimmten Schneiden.....	49
Tabelle 3-6: Darstellung der Wirkungsweise unterschiedlicher Zerkleinerungsmaschinen [89]	59
Tabelle 3-7: Effektivität von Zerkleinerungsmaschinen nach deren Beanspruchungsarten [89, 90]	61
Tabelle 4-1: Übersicht über die gepressten Probekörper aus Versuchsreihe I	75
Tabelle 4-2: Steigerung der Rohdichte in Abhängigkeit von Temperatur und Druckkraft.....	75
Tabelle 4-3: Versuchsmatrix der 2. Versuchsreihe, abgeleitet von den Ergebnissen der 1. Versuchsreihe	81
Tabelle 4-4: Ergebnisse der Kugeleindruckprüfung mit Darstellung der Eindringtiefe U verschiedener Prüfkörper in mm	100
Tabelle 4-5: Darstellung der Ergebnisse der Berechnung des E-Moduls anhand der Entlastungskurve des Kugeleindruckversuches beider Wachsprüfkörper	102
Tabelle 4-6: Fräsparameter zur Herstellung der Testgeometrie.....	107
Tabelle 4-7: Richtwerte der Auszugsfestigkeiten verschiedener Verbindungsmittel an Prüfkörpern T40D5	116
Tabelle 4-8: Vergleich der Richtwerte der Auszugsfestigkeiten von Holzbauschrauben an Prüfkörpern T40D5 und T20D3,5 mit Vorbohrung und warmer Schraube.....	117
Tabelle 4-9: Richtwerte der Auszugskräfte von Holzbauschrauben und Rampa-Muffen bei Versuchen an einem Wachrohr im Maßstab 1:1	119
Tabelle 4-10: Vergleich der Richtwerte der Auszugsfestigkeiten zwischen kleinformatischen Prüfkörpern und Wachrohren im Maßstab 1:1	120
Tabelle 5-1: Herstelltemperatur und Material der Wachrohrhinge.....	142

7.3 Abbildungsverzeichnis

Bei allen, die durch Überlassung ihrer Bildvorlagen, durch Erteilung von Reproduktionserlaubnis und durch Auskünfte am Zustandekommen dieser Dissertation mitgewirkt haben, möchte ich mich aufrichtig bedanke. Trotz intensiven Bemühens konnten nicht alle Urheber von Abbildungen ermittelt werden, ihre Urheberrechte sind jedoch gewahrt. In diesen Fällen wird um entsprechende Nachricht gebeten. Fotos / Abbildungen, die hier nicht aufgeführt sind oder keine Quellenangabe besitzen, stammen vom Autor und dürfen ohne dessen Zustimmung nicht vervielfältigt werden.

Abbildung 1-1: Schematische Darstellung der Prozesskette für freigeformte Betonbauteile auf Basis von technischen Wachsen [9] © ITE	2
Abbildung 1-2: Schematische Darstellung des vollautomatisierten Herstellungsverfahrens für freigeformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von recycelbarem CFW am Beispiel der Betonierung freigeformter Stützen © ITE	4
Abbildung 2-1: Schalkonstruktion um 1950 aus Brettern und Kanthölzern, Schalung einer Betonwand mit sogenannten Donau-Schalplatten (v. l. n. r.) [14]	9
Abbildung 2-2: Rudolf Steiner/Ernst Aisenpreis2. Goetheanum in Dornach, manuell aus Brettern hergestellte Einschaltung des 2. Goetheanums, nach dem Ausschalen hergestellte, komplexe Stahlbetongeometrie des 2. Goetheanums (v. l. n. r.) [15, 16]	10
Abbildung 2-3: Herstellung der Schalung für den Trans World Airlines Terminal, fertig hergestelltes Trans World Airlines Terminal in New York von 1956 (v. l. n. r.) [15]	10
Abbildung 2-4: Joseph Molier um 1900, vorgefertigtes Bahnwärterhaus um 1900 (v. l. n. r.) [18]	11
Abbildung 2-5: Modell des Dymaxion-Hauses von Richard Buckminster Fuller , Prototyp des Dymaxion-Hauses von 1927 (v. l. n. r.) [15].....	11
Abbildung 2-6: Montage eines vorgefertigten Wandelements [20], Montage einer vorgefertigten Deckenplatte (v. l. n. r.) [21].....	12
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Skelettbauweise mit Bauteilbezeichnungen [22], Stahlbeton-Skelettbau (Foto: H. Kloft) (v. l. n. r.)	13

Abbildung 2-8: Elementdecke als Halbfertigteil inkl. unterer Bewehrungslage und Abstandshaltern für obere Bewehrungslage; Stützung einer Elementdecke während der Betonage und des Aushärtungsprozesses der Ortbetonschicht (v. l. n. r.) [23]	13
Abbildung 2-9: Elementwand mit zwei gegenüberliegenden Fertigteilplatten, die durch Gitterträger verbunden sind; Montage einer Elementwand; die Anschlussbewehrung der Bodenplatte kann integriert werden. Nach der Montage wird der Hohlraum zwischen den beiden Fertigteilplatten mit Ortbeton ausbetoniert (v. l. n. r.) [24, 25].....	14
Abbildung 2-10: Schalungsbau auf der Baustelle; ausgeschaltes Stahlbetonbauteil; fertiges Mercedes Benz Museum von UNStudio (v. l. n. r.) [17].....	15
Abbildung 2-11: Darstellung der drei Gebäude A, B, C des neuen Zollhofs in Düsseldorf während unterschiedlicher Bauzustände; Zusammenbau der aus EPS gefrästen Schalung für die Herstellung von freigeformten Stahlbetonwänden; mit aus EPS gefrästen Schalungen hergestellte freigeformte Stahlbetonwände (v. l. n. r.) [27].....	16
Abbildung 2-12: neuer Zollhof in Düsseldorf – Darstellung der einzelnen Gebäude C, B, A (v. l. n. r.) [28]	16
Abbildung 2-13: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Umlauffertigungsanlage [22]	17
Abbildung 2-14: Darstellung unterschiedlicher, magnetisch haftender Formseitenteile	17
Abbildung 2-15: Robotergestütztes Platzieren der Formseitenteile, Integration des Bewehrungskorbs in die Schalung, Nachbehandlung der Oberfläche durch maschinelles Abreiben des betonierten Betonbauteils, Entnahme der erhärteten Betonwand mittels Kipptisch (v. l. n. r.) [22]	18
Abbildung 2-16: Beispiele für Fertigteilschalungen im Standfertigungsverfahren, Schalung für die Herstellung rechteckiger Betonunterzüge, verspannbare TT-Platten-Schalung, Batterieschalung zur Herstellung von Wandelementen, Stahlschalung für Betonbauteile in Form eines umgekehrten U (v. l. n. r.) [22].....	18
Abbildung 2-17: Darstellung einer Lagerfläche eines Fertigteilwerks, das Standard-Betonrohre für die Abwassertechnik produziert. [22]	19
Abbildung 2-18: Darstellung unterschiedlicher Betonwaren in Form von Pflastersteinen, Platten, Pflanzsteinen und Mauersteinen aus Beton. [22].....	20
Abbildung 2-19: Schematische Darstellung der Herstellung von Rohren mittels Schleuderverfahren: (1) Rollbank, (2) Form, (3) Laufringe, Schleudieranlage zur Herstellung von Stahlbetonrohren (v. l. n. r.) [22].....	20
Abbildung 2-20: Schematische Darstellung des Vibrationsverfahrens mit steigendem Kern (Sofortentschalung): (1) Spitzendformer, (2) Kern, (3) Kernvibrator, (4) Außenform, (5) Untering, Rohrfertiger mit steigendem Kern, hergestellte Betonrohre nach dem Entschalen (v. l. n. r.)	21
Abbildung 2-21: Bewehrungskorbschweißmaschine, produzierte Bewehrungskörbe vor dem Einsatz in die Schalung (v. l. n. r.) [22].....	21
Abbildung 2-22: Manuelle Herstellung des Gerinnes eines Schachtunterteils durch händisches Formen des erdfeuchten Betons anhand einer 2D-Skizze [22].....	22
Abbildung 2-23: Manuelle Herstellung des Gerinnes eines Schachtunterteils durch Platzieren von händisch zugeschnittenen Klinkersteinen auf einem Betonbett.....	22
Abbildung 2-24 Semi-manuelle Fertigung eines 3D-Schalelements der Firma PERI für das Aquatics Center in London [9]	23
Abbildung 2-25 RECKLI-Matrizen-Herstellungsverfahren, (1) manuelle oder maschinelle Herstellung der Positiv-Urform aus z. B. Gips, (2) Aufbringen eines Trennwachs und Abguss der Positiv-Urform mit einem flüssigen Elastomer, (3) Nach dem Erhärtungsprozess des Elastomers kann die erzeugte Negativform entnommen werden, (4) Aufsetzen der Negativform auf die Schalhaut einer bestehenden Schalung, Aufbringen von wachsähnlichem Trennmittel, (5) Betonage der Schalung mit aufgeklebter Negativform aus Elastomer, (6) Nach dem Erhärtungsprozess des Betons entschalen des Betonbauteils [29].....	24
Abbildung 2-26: Städel-Museum in Frankfurt: Fräsen von EPS-Hartschaumblöcken durch die Firma Accentform Kunststoffverarbeitung [29]; Beschichtung mit 5 mm dickem Glasfaser-Kunststoff-Laminat; manuelles Nachbearbeiten der Schalung (Foto Kloft); fertige Decke des Museums (©Foto Norbert Miguletz) (v. l. n. r.)	24
Abbildung 2-27: Zerspanung eines EPS-Werkstücks, Platzieren der hergestellten und mit Trennmittel (rosa) beschichteten Negativform in der Stahlform, Nach der Entschalung fertig hergestelltes Schachtunterteil (v. l. n. r.) [34].....	26
Abbildung 2-28: Herstellung monolithischer Abwasser-Schachtunterteile: CNC-gesteuertes Fräsen der Schalungskörper aus EPS mit dem System der B+S Peco-System, manuelles Nachschleifen der Oberfläche; Herstellung monolithischer Abwasser-Schachtunterteile: Beschichten der gefrästen EPS-Schalungskörper mit dem Trennmittel Betopro® WX-G, nach dem Abbinden der Schachtunterteile muss die EPS-Einwegschalung als Abfall entsorgt werden (v. l. n. r.) © Fotos: H. Kloft [9]	26

7. Quellenverzeichnis

Abbildung 2-29: Mittels Zerspanung von EPS hergestellte Negativform, die im Nachgang erst mit Trennmittel (rosa) und im Anschluss mit einer PUR-Beschichtung beschichtet wird, die nach der Betonage im Beton verbleibt; hergestelltes Schachtunterteil mit PUR-Kunststoff-Oberfläche (v. l. n. r.)	27
Abbildung 2-30: Ausführung einer Schachtsanierung: zu sanierendes Schachtunterteil, hergestelltes, individuelles Inlay aus PUR-Kunststoff, saniertes Schachtunterteil mit PUR-Kunststoff-Oberfläche (v. l. n. r.) [35]	28
Abbildung 2-31: Schematische Darstellung der Fertigungsanlage zur Zerspanung von Beton mittels eines Roboters mit Spindel; (1) Steuerpult, (2) Förderband, Fräsgut, (3) Industrieroboter, (4) Frässtation mit Frästisch, (5)Fräser. [36]	28
Abbildung 2-32: Zerspanende Bearbeitung des sehr steifen Betons von unten und seitlich (obere Bildhälfte), Hergestelltes Schachtunterteils und Darstellung der Oberflächenqualität (untere Bildhälfte)	29
Abbildung 2-33: Anteile der Tätigkeit gemessen an der Gesamtzeit des Ausbaus [38]	30
Abbildung 2-34: Betonerzeugnisse und Fertigteile in Deutschland; Betonerzeugnisse insgesamt gegenüber großformatigen Fertigteilen [40]	31
Abbildung 2-35: Baugewerblicher Gesamtumsatz zwischen 2002 und 2013 (oben), Entwicklung der Gesamtzahl der Bauschäden von 2002 bis 2013, *Hochrechnung für das Jahr 2013 (unten) [41]	33
Abbildung 2-36: Kosten horizontaler Bauwerkstoleranzen [44]	34
Abbildung 2-37: Ausgangsmodell eines Balkens mit Rechteckquerschnitt unter Einzellast, mögliche Variante einer Topologieoptimierung (v. l. n. r.) [44]	35
Abbildung 2-38: Auswirkungen der Planungszeit auf die Gesamtzeit (Verfasser unbekannt)	35
Abbildung 2-39: Darstellung der vollkommen autonomen Serienproduktion des Chassis eines PKWs [45]	36
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des automatisierten Gesamtherstellungsprozesses und der Teilprozesse 1 bis 5: (1) Herstellung von Wachsblöcken, (2) Zerspanung von Wachsrohlingen, (3) Modularisierung einer Gesamtschalung, (4) Betonage der Wachsschalungsmodule, (5) Rezyklieren der Wachsrohlinge © ITE	38
Abbildung 3-2: amorpher Thermoplast, teilkristalliner Thermoplast, vernetzter Duroplast (v. l. n. r.) [49]	39
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des Spritzgussverfahrens von Thermoplasten [55]	40
Abbildung 3-4: Herstellung von Holzpellets [56]	41
Abbildung 3-5: Gängige Tablettenformen [60]	42
Abbildung 3-6: Standardisierung von Tablettengrößen	42
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung des Pressvorgangs (Exzenterpresse) [60], (1) Exzenter Scheibe, (2) Oberstempelhalter, (3) Fülltrichter, (4) Oberstempel, (5) Matrize, (6) Matrizentisch, (7) Unterstempel, (8) Unterstempelhalter	42
Abbildung 3-8: Unterteilung der Verfahren zur Kerzenherstellung nach [62]	43
Abbildung 3-9: Schematische Darstellung eines Fräsprozesses – herzustellende Geometrie in Blau und Material, das zerspannt werden muss, in Rot; Schrupp-Prozess mit Walzenstirnfräser von links nach rechts; Schlichtprozess mit Radiusfräser von links nach rechts (v. l. n. r.)	44
Abbildung 3-10: Walzenstirnfräser, links-Typ N, mittig-Typ H, rechts-Typ W [66]	46
Abbildung 3-11: Schaftfräser unterteilt in drei Werkzeugtypen [66, 72]	47
Abbildung 3-12: Radiusfräser mit zwei Schneiden	47
Abbildung 3-13: Frässtrategien, schwarze Pfeillinien sind Fräswege, grau-gestrichelte Linien sind Leerfahrten des Fräswerkzeugs	48
Abbildung 3-14: schematische Darstellung der Bearbeitungsparameter beim Fräsen mit bestimmten Schneiden	49
Abbildung 3-15: Modular zusammengesetzte Rahmenschalung für gerade Wandsysteme von Peri GmbH [76]	50
Abbildung 3-16: 3500-kN-Großpresse der B+S Engineering GmbH	51
Abbildung 3-17: Gepresster runder Wachsrohling auf SVE $\varnothing = 1000$ mm, Fräsbearbeitung der Seiten, fertiger Wachsrohling 700/700 mm mit variabler Höhe (v. l. n. r.)	51
Abbildung 3-18: Finaler Entwurf der SVE, Darstellung der abnehmbaren Füllstücke, halbtransparente Darstellung der SVE mit abnehmbaren Füllstücken (v. l. n. r.)	52
Abbildung 3-19: FEM-Simulation der SVE unter maximaler Presskraft von 3500 kN; Konstruktionszeichnung der Stahlverbindingseinheit (SVE) mit Füllstücken (v. l. n. r.)	52
Abbildung 3-20: Zwei SVE, drei SVE mit den Füllstücken als Kreisabschnitte (v. l. n. r.)	53
Abbildung 3-21: Diagramm für die Bestimmung des Frischbetondrucks $\sigma_{hk,max}$ in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit v und der Konsistenzklasse bei einem Erstarrungsende t_E von 10 h [82], Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe gemäß DIN 18218 [82, 83]; v =Steiggeschwindigkeit, t_E =Erstarrungsende, H =Schalungshöhe, h_s =hydrostatische Druckhöhe, h_E =Betonierhöhe bei Erreichen des Erstarrungsendes t_E (v. l. n. r.)	55

Abbildung 3-22: Temperatur/Hydratationszeit – Diagramme: Versuch am ITE zur Messung der Entwicklung der Hydratationstemperatur an der Zwischenschicht von einem Betonprobekörper (30 x 30 x 30 cm) zu einer umlaufenden 10 cm starken XPS-Isolierschicht, UHPC (Typ UHPC ND-2,5) rot, Normal- bzw. Feinkornbeton C30/37 (etwa. 400 kg/m ³ Portland Zement PUR 4 N) schwarz. [9]	56
Abbildung 3-23: unterschiedliche Beanspruchungsarten nach Rumpf [88, 89].....	58
Abbildung 3-24: Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen nach Korngrößenbereichen des Aufgabegutes, Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen nach Mahlguteigenschaften (v. l. n. r.) [89]	60
Abbildung 3-25: Schematische Darstellung der zwei Teilrecyclingprozesse	61
Abbildung 3-26: schematische Darstellung des Querschnitts eines Hammerbrechers mit Siebrost [89].....	62
Abbildung 3-27: schematische Darstellung des Querschnitts einer Stiftmühle [89]	62
Abbildung 4-1: Strukturformel von n-Butan [95]	63
Abbildung 4-2: Prinzip gestapelter Wachs-Schalungsmodule als Stützenschalung. Rot: Druckbelastung der Wachsrohlinge durch den horizontal angreifenden Frischbetondruck; Schwarz: Lastabtrag der Stahlschalungsmodule	64
Abbildung 4-3: Pressformen für zylindrische ($\varnothing = 100 \text{ mm}$, $h = 500 \text{ mm}$) und quadratische Probekörper ($a/b = 120/120 \text{ mm}$, $h = 500 \text{ mm}$); Konstruktionszeichnungen der beiden Pressformen von B+S (v. l. n. r.)	65
Abbildung 4-4: Flowchart-Darstellung der durchgeführten Versuche hinsichtlich der Druckfestigkeit	66
Abbildung 4-5: Lieferform der Pastillen; Lieferform der Tafeln (v. l. n. r.)	67
Abbildung 4-6: Zusammengespannter Block aus Wachstafeln; zerspanter Wachsblock und Wachsspäne (v. l. n. r.)	67
Abbildung 4-7: Spangrößenverteilung absolut; Spangrößenverteilung prozentual; Siebmaschine mit übereinander gestapelten, von oben nach unten kleiner werdenden Sieben (v. l. n. r.).....	68
Abbildung 4-8: Darstellung der Volumenkontraktion von Wachsgranulat bei 20 °C mit unterschiedlichem Größtkorn	68
Abbildung 4-9: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung „Mehrschichtiges Aufpressen“	69
Abbildung 4-10: Zerspannungsergebnis „Mehrschichtiges Aufpressen“ bei 20 °C	70
Abbildung 4-11: Einfluss der Presskraft im ersten Pressschritt auf die Volumenkontraktion.....	70
Abbildung 4-12: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Wachsproben mit unterschiedlichem Größtkorn (gemittelt).....	72
Abbildung 4-13: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Prüfkörper und der Druckfestigkeitsuntersuchung der Prüfkörper	73
Abbildung 4-14: Verwendete Wachsspäne	73
Abbildung 4-15: Pressform mit passgenauem Stempel; Werkstattpresse (1) mit Druckhebel (2), Pressform (3), Stempel (4) und Kraftmessdose (5) (v. l. n. r.)	74
Abbildung 4-16: Ausdehnung der Probekörper nach der Herstellung in Abhängigkeit von Druckkraft und Temperatur	76
Abbildung 4-17: Probekörper mit spröder Oberfläche und Abplatzungen an der Kante; Probekörper mit glatter Oberfläche ohne Abplatzungen (v. l. n. r.).....	76
Abbildung 4-18: Prüfkörper in Druckprüfmaschine - Probekörper vor der Prüfung; zerstörter Prüfkörper (v. l. n. r.)	77
Abbildung 4-19: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von Herstellungsdruck- und Temperatur	77
Abbildung 4-20: Darstellung der gemittelten Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Presskräften und bei konstanten 40°C Herstelltemperatur; Darstellung der gemittelten Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Herstelltemperaturen und bei konstanten 50 kN Presskraft (v. l. n. r.).....	78
Abbildung 4-21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei konstanter Herstelltemperatur von 30 °C und unterschiedlichen Presskräften	79
Abbildung 4-22: Volumenkontraktion bei der Herstellung in Abhängigkeit von der Druckkraft und der Herstelltemperatur; Rissbildung im unteren Bereich bei der Probe T30D2#1 (v. l. n. r.)	80
Abbildung 4-23: Ausbeulung und Rissbildung an der Unterseite des Prüfkörpers; abgesägte Unterseite ohne Risse (v. l. n. r.).....	82
Abbildung 4-24: Darstellung der gemittelten Druckfestigkeitsentwicklung der gepressten Wachsprüfkörper T35-55 und D45-55	82
Abbildung 4-25: Darstellung der Ergebnisse der maximal erreichten Druckfestigkeiten der Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe; Rissbildung über die komplette Prüfkörperhöhe am Beispiel des Prüfkörpers T40D5,5 #2 (v. l. n. r.)	83
Abbildung 4-26: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien bei Druckkräften zwischen 55 kN und 100 kN bei einer Herstelltemperatur $T=40^{\circ}\text{C}$	84
Abbildung 4-27: Bruchbild des Probekörpers T40D5,5 mit einer Höhe von 7,5 cm	86
Abbildung 4-28: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien bei halber und normaler Höhe	86
Abbildung 4-29: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien zwischen Prüfkörpern in Würfel- und Zylinderform.....	87

7. Quellenverzeichnis

Abbildung 4-30: Darstellung der kubischen Prüfkörper nach der Druckfestigkeitsuntersuchung - T40D5,5 geringe Rissbildung; T20D3,5 starke Rissbildung (v. l. n. r.).....	88
Abbildung 4-31: Darstellung der Ergebnisse der Kriechversuche, Verformung der Prüfkörper unter konstanter Last (gemittelt)	89
Abbildung 4-32: Darstellung der Kriechversuche vor und nach der Prüfung; T20D3 vor der Prüfung, T20D3 nach der Prüfung; T40D5 vor der Prüfung; T40D5 nach der Prüfung (v. l. n. r.).....	89
Abbildung 4-33: Versuchsmatrix zur Untersuchung von Füllstoffen und deren Einfluss auf die Druckfestigkeit; gerissener Prüfkörper mit 50 % Cellulose-Masseanteil (v. l. n. r.).....	90
Abbildung 4-34: Wachs (weiß) und Cellulose (gelb/braun) unvermischt, teilweise vermischt, homogen vermischt (v. l. n. r.)	91
Abbildung 4-35: ungleichmäßige Ausdehnung bei 30 % Celluloseanteil	91
Abbildung 4-36: Starke Abplatzungen nach dem Prüfen vom Probekörper mit 10 % Cellulose.....	92
Abbildung 4-37: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien (Mittelwerte) der Prüfkörper mit Baumwolle und der Prüfkörper ohne Zusatzstoffe	92
Abbildung 4-38: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien (Mittelwerte) der Prüfkörper mit Cellulose und der Prüfkörper ohne Zusatzstoffe; Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien (Mittelwerte) der Prüfkörper mit Kalksteinmehl und der Prüfkörper ohne Zusatzstoffe (v. l. n. r.)	93
Abbildung 4-39: Herstellprozess der Wachsspäne mit eingearbeitetem Kalksteinmehl als Zusatzstoff; maschinelles Einrühren des Kalksteinmehls in das flüssige Wachs; Einfüllen des flüssigen Wachsgemisches in die Abkühlform; Zerspanung des kalten Wachsblocks zwecks Spanherstellung; hergestellte Wachsspäne mit eingearbeitetem Kalksteinmehl (v. l. n. r.)	94
Abbildung 4-40: Darstellung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen zylindrischer Prüfkörper mit den Herstellparametern T20D3,5 und T40D5 sowie 50 Vol.-% Kalksteinmehl	95
Abbildung 4-41: Darstellung der Ergebnisse der Kriechversuche, Verformung der Prüfkörper mit und ohne Zusatzstoffe unter konstanter Last.....	96
Abbildung 4-42: Darstellung der einzelnen Temperaturkurven in Abhängigkeit von der Erwärmungstemperatur	97
Abbildung 4-43: Dauer der Erwärmungs- und Abkühlphasen der einzelnen Prüfkörper in Stunden	97
Abbildung 4-44: Darstellung der Druckfestigkeitsentwicklung der Prüfkörper, die nach der Herstellung temperiert wurden; Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten der Prüfkörper, die nachträglich temperiert wurden, mit Prüfkörpern, die nicht temperiert wurden (v. l. n. r.)	98
Abbildung 4-45: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Durchführung des Oberflächenfestigkeitsversuchs (Kugeleindruckversuch)	99
Abbildung 4-46: Darstellung des Versuchsaufbaus mit Prüfkörper in der Universalprüfmaschine; Fotoausschnitt während der Prüfung mit Eindringkugelhalter; computerunterstützte Auswertung der Versuchsergebnisse (v. l. n. r.)	100
Abbildung 4-47: Darstellung der Versuchsergebnisse anhand eines Kraft-Weg-Diagramms am Beispiel zweier Prüfkörper T40D5#1 und T20D3#1. Der Versuch teilt sich in Belastung und Entlastung der Prüfkörper auf.	101
Abbildung 4-48: Optimale Drageekernformen für gleichmäßig dicke Zuckerüberzüge, D=Drageekerndurchmesser, h=Drageekernhöhe, S=Steghöhe, rw=Wölbungsradius, y=minimale Dicke des Überzugs, x und z=maximale Dicke des Überzugs [60,61].....	103
Abbildung 4-49: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Prüfkörper mit unterschiedlichen Stempelformen und Druckfestigkeitsuntersuchung der plangefrästen Prüfkörper	104
Abbildung 4-50: Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung der Prüfkörper mit unterschiedlicher Stempelform – Prüfkörper hergestellt bei T20D3; Prüfkörper hergestellt bei T40D5 (v. l. n. r.).....	104
Abbildung 4-51: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Prüfkörper und der Fräsuntersuchungen der Prüfkörper	106
Abbildung 4-52: In die Drei-Achs-Fräse eingesetzter Wachsprüfkörper T10D1.....	106
Abbildung 4-53: Theoretische Geometrie der gefrästen Wachskörper mit markierten Bereichen [9]	107
Abbildung 4-54: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper T10D1 und T10D5 (v. l. n. r.)	108
Abbildung 4-55: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper T40D1 und T40D5 (v. l. n. r.)	108
Abbildung 4-56: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper T40D10 (v. l. n. r.)	109
Abbildung 4-57: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper mit 20 % Baumwolle T20D4 und T40D5,5 (v. l. n. r.)	109
Abbildung 4-58: Darstellung der Fräsergebnisse der Prüfkörper mit 20 % Cellulose T20D4 und T40D5,5 (v. l. n. r.)	110
Abbildung 4-59: Darstellung der drei untersuchten Prüfkörper – Prüfkörper T40D5; Prüfkörper T40D5 mit 20 % Cellulose; Prüfkörper aus gegossenem Wachs; Darstellung des optischen Messverfahrens (v. l. n. r.)	110
Abbildung 4-60: Vergleich des Ergebnisses des optischen Messverfahrens mit dem digitalen Modell, Prüfkörper T40D5	110

Abbildung 4-61: Vergleich des Ergebnisses des optischen Messverfahrens mit dem digitalen Modell, Prüfkörper T40D5 mit 20 % Cellulose.....	110
Abbildung 4-62: Vergleich des Ergebnisses des optischen Messverfahrens mit dem digitalen Modell, Prüfkörper aus gegossenem Wachs.....	111
Abbildung 4-63: Mikroskopaufnahmen des neuen Ein-Zahn-Fräswerkzeuges, Draufsicht (obere Bildhälfte), Ansicht (unter Bildhälfte), Vergrößerungsgrad 8-fach, 25-fach, 40-fach (v. l. n. r.).....	112
Abbildung 4-64: Mikroskopaufnahmen des gebrauchten Ein-Zahn-Fräswerkzeuges, Draufsicht (obere Bildhälfte), Ansicht (unter Bildhälfte), Vergrößerungsgrad 8-fach, 25-fach, 40-fach (v. l. n. r.).....	112
Abbildung 4-65: Darstellung der in diesem Kapitel untersuchten unterschiedlichen Verbindungsmittel.....	113
Abbildung 4-66: Wachsprüfkörper mit eingedrehter Holzbauschraube, Darstellung des Versuchsaufbaus, ausgerissene Schraube nach der Versuchsdurchführung, zerstörter Wachsprüfkörper nach der Versuchsdurchführung (v. l. n. r.).....	114
Abbildung 4-67: Richtwert für die Auszugskraft (gemittelt) sowie das Verhältnis der einzelnen Verbindungsmittel; Diagramm der normierten Verhältnisse der einzelnen Verbindungsmittel (v. l. n. r.).....	115
Abbildung 4-68: Prüfkörper mit rausgezogener Rampa-Muffe, die vor dem Pressprozess in der Pressform fixiert und mit Wachsspänen umpresst wurde.....	115
Abbildung 4-69: Richtwert für die Auszugskraft für umpresste Rampa-Muffen (gemittelt); Diagramm der normierten Verhältnisse der jeweiligen Rampa-Muffe (v. l. n. r.).....	116
Abbildung 4-70: Wachsrohling, in den eine auf 100 °C erwärmte Schraube eingedreht wurde, mit geschmolzenem Wachs an der Oberfläche; Ausbruchsbild nach Auszugsversuch; Zerstörter Wachsrohling und Schraube mit Anhaftungen (v. l. n. r.).....	117
Abbildung 4-71: Holzbauschraube l=50, Holzbauschraube l=80, Holzbauschraube l=100, Rampa-Muffe M10 l=50, Rampa-Muffe M10 l=60, Rampa-Muffe M10 l=70, Rampa-Muffe M12 l=60, Rampa-Muffe M12 l=80, Rampa-Muffe M12 l=100, Rampa-Muffe M16 l=60, Rampa-Muffe M16 l=90, Rampa-Muffe M16 l=100 (v. l. n. r. und o. n. u.).....	118
Abbildung 4-72: Versuchsaufbau mit Wachsrohling (Maßstab 1:1), Einbringen einer Rampa-Muffe, Ausbruchbild nach Auszugsversuch (v. l. n. r.).....	119
Abbildung 4-73: Digitales Modell der Testgeometrie zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Trennmittel auf die Entschalbarkeit.....	121
Abbildung 4-74: Darstellung der gefrästen Wachsschalung in Form eines X; Betonage der Schalung; Entschalen des Betonkörpers mit Hilfe von Druckluft (v. l. n. r.).....	122
Abbildung 4-75: Obere Reihe – T20D6,4; ohne Trennmittel, Pieri Cire LM 33; Pieri Debcobio 310; Pieri DM 14-2089; Teflonspray (v. l. n. r.); untere Reihe – T40D10,1; ohne Trennmittel, Pieri Cire LM 33; Pieri Debcobio 310; Pieri DM 14-2089; Teflonspray (v. l. n. r.).....	122
Abbildung 4-76: Darstellung der Abzeilabstände A im Vergleich zum Fräserdurchmesser D.....	123
Abbildung 4-77: Obere Reihe – quadratische Wachsrohlinge, Abzeilabstände links: 0,5 mm, rechts: 0,1 mm; untere Reihe – quadratische Wachsrohlinge, Abzeilabstände links: 2,0 mm, rechts: 1,0 mm.....	124
Abbildung 4-78: Versuchsdurchführung der optischen 3D-Vermessung der hyperbolischen Paraboloidschale am Beispiel des Betonkörpers.....	125
Abbildung 4-79: Einfluss der Fräsbahnplanung (Zick-Zack, Bahnplanung, Spiralbahnplanung (v. l. n. r.)) sowie der Einsatz von Trennmittel auf die Wachsschalung und den Betonkörper in Form einer hyperbolischen Paraboloidschale (HP-Schale); Bildaufnahmen nach dem Entschalen; Darstellung der optischen 3D-Vermessung; Soll-Ist-Vergleich zwischen dem Ergebnis der optischen 3D-Vermessung und dem digitalen Modell (v. o. n. u.).....	126
Abbildung 4-80: Vergleich Sieblinien Fräsen und Mahlen von Wachs (Partikelgrößenverteilung).....	127
Abbildung 4-81: Ablaufdiagramm des Mahlprozesses.....	128
Abbildung 4-82: Hammermühle HM671 (Innenansicht), Mahlergebnis gepresster Wachsprüfkörper mit Hammermühle; Hammermühle HM671 Produktfoto © Fa. Jehmlich (v. l. n. r.).....	128
Abbildung 4-83: Universalmühle/Prallmühle Rekord B-SN (Innenansicht), Mahlergebnis der Wachspellets mit Prallmühle; Universalmühle/Prallmühle Rekord B-SN Produktfoto © Fa. Jehmlich (v. l. n. r.).....	128
Abbildung 4-84: Vergleich der gemittelten Druckfestigkeiten von Wachsprüfkörpern nach dem jeweiligen Recycling-Prozess mit unterschiedlichen Spänen; blaue Kurve – Spanherstellung durch Abfräsen von Wachstafeln (Referenz); gelbe Kurve – Späne, die beim Fräsprozess angefallen sind; graue Linie – Wachsspäne, die mit Hilfe der Hammermühle aus gepressten Wachsrohlingen hergestellt wurden; orangene Linie – Wachsspäne, die mit Hilfe der Prallmühle aus Wachspellets hergestellt wurden – T20D3; T40D5 (v. l. n. r.).....	129
Abbildung 4-85: Systemmikroskop Typ Leica DM LM.....	130

7. Quellenverzeichnis

Abbildung 4-86: Darstellung der Aufnahmen (mittels des Systemmikroskops Typ Leica DM LM) jener Wachsspäne, die nach 4.2.1.1 produziert wurden – 140-fach; 280-fach; 600-fach (v. l. n. r.).....	130
Abbildung 4-87: Darstellung der Aufnahmen mittels Systemmikroskop Typ Leica DM LM der Wachsspäne, die aus gepressten Wachsprüfkörpern mit Hilfe einer Hammermühle hergestellt wurden – 140-fach; 280-fach; 600-fach (v. l. n. r.)	131
Abbildung 5-1: Digitaler Stützenentwurf, Ansicht aus vier Perspektiven.....	132
Abbildung 5-2: Digitaler Stützenentwurf, halbierte Stütze, zu fräsende Geometrie im Wachs (v. l. n. r.)	133
Abbildung 5-3: CAD-Soll-Geometrie; CAD-Modell in CAM-Software (v. l. n. r.).....	133
Abbildung 5-4: Darstellung des Schrupp-Prozesses in der CAM-Software; virtuelles Fräsergebnis nach dem Schrupp-Prozess (v. l. n. r.)	134
Abbildung 5-5: Darstellung des Schlicht-Prozesses in der CAM-Software; virtuelles Fräsergebnis nach dem Schlicht-Prozess (v. l. n. r.)	134
Abbildung 5-6: Walzenstirnfräser d=80 mm, vier Schneiden.....	134
Abbildung 5-7: Kugelkopffräser d=20 mm, zwei Schneiden	135
Abbildung 5-8: Optische 3D-Messtechnik der Wachsschalung; Soll-Ist-Vergleich der Wachsschalung mit dem digitalen Modell (v. l. n. r.).....	135
Abbildung 5-9: Ausgeschalte Stützenhälften aus UHPC; Soll-Ist-Vergleich der Stützenhälften mit dem digitalen Modell (v. l. n. r.).....	136
Abbildung 5-10: Darstellung des digitalen Negativmodells des herzustellenden Schachtsammlers	137
Abbildung 5-11: Darstellung des Schrupp-Prozesses mit einem Walzenstirnfräser d=80 mm in der CAM-Software; Darstellung des Schlichtprozesses mit einem Kugelkopffräser d=25 mm in der CAM-Software(v. l. n. r.)	137
Abbildung 5-12: Wachsrohling mit Vakuumtechnik auf dem Frästisch; Wachsrohling nach dem Schrupp-Prozess; Nahaufnahme der Oberflächenqualität nach dem Schrupp-Prozess (v. l. n. r.)	137
Abbildung 5-13: Wachsrohling während des Schlichtprozesses; Wachsrohling nach dem Schlichtprozess, seitliche Aufnahme; Wachsrohling nach dem Schlichtprozess, frontale Aufnahme (v. l. n. r.)	138
Abbildung 5-14: Darstellung der optischen 3D-Messung des Wachsschalungsnegativs bei der Firma GOM GmbH in Braunschweig; Ergebnis des Soll-Ist-Vergleichs des Wachsschalungsnegativs (v. l. n. r.)	138
Abbildung 5-15: Wachsschalungsnegativ mit aufgesetzten Anschlussgeometrien inkl. Beschichtung dieser mit grünem Trennmittel speziell für EPS; Zusammengebaute Gesamtschalung für die Herstellung des Schachtsammlers; Betonage der Schalung; zum Teil ausgeschalteter Schachtsammler (v. l. n. r.)	139
Abbildung 5-16: Versuch der pneumatischen Entschalung; händisches Rausbrechen der Wachsschalung; Entnahme eines Teils der Wachsschalung (Gerinne) (v. l. n. r.).....	139
Abbildung 5-17: Darstellung der optischen 3D-Messung des Betonschachtsammlers durch die Firma GOM GmbH in Braunschweig; Soll-Ist-Abgleich des Betongerinnes; hergestellter Betonschachtsammler, seitliche Aufnahme 1; hergestellter Betonschachtsammler, seitliche Aufnahme 2 (v. l. n. r.).....	140
Abbildung 5-18: Aufbaustrategie der Wachsschalungsmodule	140
Abbildung 5-19: Zwei der fünf gepressten Wachsrohlinge, die bei 8 °C gepresst wurden.	142
Abbildung 5-20: Schafffräser d=50 mm, 15 0mm Schneidenhöhe, acht Schneiden	142
Abbildung 5-21: Fräsergebnis nach dem Schrupp-Prozess; Fräsergebnis nach dem Schlichtprozess – Wachsrohling Nr.1 (v. l. n. r.).....	143
Abbildung 5-22: Fräsergebnis nach dem Schrupp-Prozess; Fräsergebnis nach dem Schlichtprozess – Wachsrohling Nr.3 (v. l. n. r.).....	143
Abbildung 5-23: Montage der Schalung; Betonage der Schalung; Ausschalen des Stützenkopfes (v. l. n. r.)	144
Abbildung 5-24: Wachsschalungsmodul nach der Entschalung; Soll-Ist-Abgleich (v. l. n. r.).....	144
Abbildung 5-25: Hergestellter Stützenkopf; Soll-Ist-Abgleich des Stützenkopfes (v. l. n. r.).....	145
Abbildung 5-26: ConFormWax – DSC-Graph der aufgenommenen Wärmeenergie je Temperatur [9]	146
Abbildung 6-1: Entschalung des Schachtsammlers mit Hilfe von Vakuumtechnik; hergestellter Schachtsammler; Nahaufnahme der erreichten Oberflächenqualität des Schachtsammlers; Entschalte und intakte Wachsschalung (v. l. n. r.) (Fotos © B+S Engineering GmbH)	151
Abbildung 6-2: Zusammenbau der Schalungsmodule; Integration der Stahlbewehrung; Ausgeschalte freigeformte Stahlbetonstütze; Messestand mit Ausstellung der Stahlbetonstütze rechts und einem Schalungsmodul links (v. l. n. r.) (Fotos © B+S Engineering GmbH).....	151

8 Werdegang

Franz Wirth (*1987 in Limburg an der Lahn) studierte Bauingenieurwesen an der Hochschule RheinMain in Wiesbaden und schloss sein Studium dort 2013 mit seiner Masterarbeit im Fach Stahlbau bei Herrn Prof. Kühne ab. Während seines Studiums war er Tutor im Fach Statik und betreute Übungen für die Fächer Festigkeitslehre und Statik ebener Stabtragwerke bei Herrn Prof. Kanz.

Nach seinem Studium arbeitete er von 2013 bis 2014 als Projektingenieur im Ingenieurbüro osd (office for structural design) in Frankfurt am Main bei Herrn Prof. Kloft und Herrn Prof. Fäth. Neben seiner beruflichen Tätigkeit bei osd unterstützte er seinen Vater in dessen Ingenieurbüro in Limburg.

Nach dem Einblick in die Lehre während seines Studiums und dem Sammeln von Berufserfahrung, war sein Ziel, seine Einblicke in die Lehre und Forschung zu vertiefen. 2014 begann er seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter für Forschung und Lehre bei Prof. Kloft am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) an der Technischen Universität Braunschweig.

Neben der Durchführung von Lehrveranstaltungen wie u.a. Tragwerkslehre, Tragwerksentwurf und Tragwerksplanung arbeitete er im Team zwischen Mitarbeitern des ITE und dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Abt. Baustoffe mit, welches ein Forschungsprojekt im DFG Schwerpunktprogramm 1542: „Leicht Bauen mit Beton“ durchführte.

Von Mitte 2017 bis Anfang 2019 war er Projektleiter eines durch die AiF Projekt GmbH (Projekträger des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie - BMWi) geförderten Kooperationsforschungsprojekt zwischen dem ITE und der Firma B+S Engineering GmbH in Rheine mit dem Titel: Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen - Verfahrensentwicklung, Analyse und Versuche zur Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen.

Von 2015 bis 2017 unterstützte er Herrn Dr.-Ing. J. Mainka bei der Realisierung und den Betrieb des neuen Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL).

E-Mail: franzwirth@gmx.de

9 Anhang

- Anhang A: Produktdatenblätter
- Anhang B: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.1.4
Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
- Anhang C: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.2.1
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10 °C-50 °C, Presskraftbereich 10 kN-50 kN
- Anhang D: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.2.2
Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35 °C-45 °C, Presskraftbereich 35 kN-55 kN
- Anhang E: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.2.3
Versuchsreihe 3: Steigerung der Presskraft auf 100 kN
- Anhang F: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.3.1
Einfluss der Prüfkörpergeometrie
- Anhang G: Versuchsprotokolle der Zeitstandfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.3.2
Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
- Anhang H: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.3.3
Zusatzstoffe im Wachs
- Anhang I: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.3.4
Zusatzstoffe in flüssigem Wachs
- Anhang J: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.3.5
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
- Anhang K: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.3.7
Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
- Anhang L: Versuchsprotokolle der Oberflächenfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.2.3.6
Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper
- Anhang M: Versuchsprotokolle der Druckfestigkeitsuntersuchungen zu Kapitel 4.6.2
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs mit den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4
- Anhang N: Mahlversuchsprotokolle

Anhang

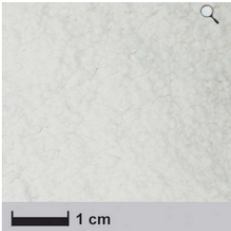
Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Baumwollflocken

Startseite

www.r-g.de ; Zugriff am 25.06.2019

Produktdetails




1 cm

Baumwollflocken

ab **0,87 € / 100 g**

Anzahl bewerten



weitere Produkte von R&G

Beschreibung


- Ergibt leichte, thixotrope Füllmassen
- Für Epoxyd-, Polyester- und Polyurethanharze

Anwendungsgebiet:
Herstellung leichter, nicht ablaufender Kleber und rieselfähiger Preßmassen sowie Kupplungsschichten im Formenbau, wobei eine Mischung aus 50 Vol.-% Glasfaserschnitzeln und 50 Vol.-% Baumwollflocken verwendet wird. Baumwollflocken erhöhen die Dimensionsstabilität sowie die Schlag- und Abriebfestigkeit der Formstoffe. Sehr gut geeignet für Epoxyd-, Polyester- und Polyurethanharze sowie Gummimischungen. Gute Chemikalienfestigkeit (auch Alkalien). Sehr preiswert. Schüttdichte: 4,5 Liter Baumwollflocken = 1 kg (0,22 g/cm³)

Aussehen: weiße Flocken, Faserlänge: ca. 350 µm (typisch 150–500 µm), Faser-Durchmesser: 10–25 µm (1–3 Denier), spezifisches Gewicht: 1,5 g/cm³, verkohlt bei 120 °C, Zersetzung bei 150 °C, Zugfestigkeit bis ca. 800 N/mm² Unlöslich in Aceton, Dimethylformamid oder 40 % NaOH, Wasseraufnahme ca. 0,3 g pro g Baumwollflocken. Die Volumenangabe dient zur besseren Vorstellung der Liefermenge. Es handelt sich dabei um die lose Schüttmenge. Bei Transport und Lagerung kann sich der Gebindeinhalt verdichten.

Sicherheitsdatenblatt: Sicherheitsdatenblätter werden auf Grundlage der REACH-Verordnung für gefährliche Stoffe und Gemische gefordert. Baumwollflocken sind weder gefährlich noch ein Stoff oder Gemisch im Sinne der REACH-Verordnung. Es handelt sich um ein Erzeugnis, für das definitionsgemäß kein Sicherheitsdatenblatt erstellt werden kann.

R&G Laminatrechner



[Kostenlos online Laminatkennwerte ermitteln!](#)
[Einführungsvideo Laminatrechner](#)

[\[schließen \]](#)

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose



**Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung
(EG) Nr. 1907/2006 (REACH)**

Version: 5

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens

1.1. Produktidentifikator

ARBOCEL C 100

Gültigkeitsraum: Bundesrepublik Deutschland

CAS-Nr.: nicht relevant

EG-Nr.: nicht relevant

INDEX-Nr.: nicht relevant

REACH-Nr.: nicht relevant

1.2. Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird

Relevante identifizierte Verwendungen: Das Produkt ist für den berufsmäßigen Verwender bestimmt.

Verwendungen, von denen abgeraten wird: nicht relevant

1.3. Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt

Lieferant (Hersteller/Importeur/Aleinvertreter/nachgeschalteter Anwender/Händler)

J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO. KG

Holzmühle 1

D 73494 Rosenberg

Deutschland

Telefon: +49 7967 152 0

Telefax: +49 7967 152 222

Ansprechpartner für Informationen

Information

Auskunft Telefon: +49 7967 152 0

Auskunft Telefax: +49 7967 152 222

E-Mail (fachkundige Person): Michael.Zimmermann@jrs.de

Webseite: www.jrs.de

1.4. Notrufnummer

Telefon: +49 7967 152 199

ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren

2.1. Einstufung des Stoffs oder Gemischs

Verordnung (EG) Nr. 1272/2008: Krebserzeugend Cat. 2 (Carc. Cat. 2)

Richtlinie 67/548/EWG: Karzinogen Kat. 3

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

2.2. Kennzeichnungselemente

Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 [CLP]

Gefahrenpiktogramme:



Signalwort: Achtung
Gefahrenhinweise: H351 Kann vermutlich Krebs erzeugen beim Einatmen

Sicherheitshinweise: P210 Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellenarten fernhalten. Nicht rauchen.
P240 Behälter und zu befüllende Anlage erden.
P241 Explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel/Lüftungsanlagen/ Beleuchtung verwenden.
P285 Bei unzureichender Belüftung Atemschutz tragen.

Einstufung gemäß Richtlinie 67/548/EWG oder 1999/45/EG

Gefahrsymbole:



R-Sätze: Xn Gesundheitsschädlich.
R40 Verdacht auf krebserzeugende Wirkung.
S-Sätze: S22 Staub nicht einatmen.
S38 Bei unzureichender Belüftung Atemschutzgerät anlegen.

2.3. Sonstige Gefahren

Dieses Material ist brennbar, aber nicht leicht entzündbar.

ABSCHNITT 3: Zusammensetzung / Angaben zu Bestandteilen

3.1. Stoffe

nicht relevant

3.2. Gemische

Angaben zum Gemisch: 100 % Weichholzfasern, enthalten max. 85 % Weichholzstaub

Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen

Stoff:	EG-Nr.:	CAS-Nr.:	INDEX-Nr.:	REACH-Nr.:	Konzentration:	Einstufung EC 1272/2008 (CLP):	Einstufung 67/548/EEC:
Weichholzfasern	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	100 %	nicht relevant	nicht relevant
davon: Weichholzstaub	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	max. 85 %	Krebserzeugend Cat. 2 (Carc. Cat. 2)	Karzinogen Kat. 3

Stoff mit einem gemeinschaftlichen Grenzwert (EU) für die Exposition am Arbeitsplatz

nicht relevant

(Wortlaut der R-, H- und EUH-Sätze: siehe Abschnitt 16.)

Zusätzliche Hinweise

Stoff ist nicht registrierpflichtig gemäß REACH Anhang IV und V.

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

ABSCHNITT 4: Erste-Hilfe-Maßnahmen

4.1. Beschreibung der Erste-Hilfe-Maßnahmen

- Allgemeine Hinweise:** Durch mechanische Einwirkungen des Produktes (z.B. Verklebungen) können Schädigungen erfolgen.
Bei Auftreten von Symptomen oder in Zweifelsfällen ärztlichen Rat einholen.
- Nach Einatmen:** Für Frischluft sorgen.
- Nach Hautkontakt:** nicht relevant
- Nach Augenkontakt:** Sofort vorsichtig und gründlich mit Augendusche oder mit Wasser spülen.
Bei andauernden Beschwerden Arzt aufsuchen.
- Nach Verschlucken:** nicht relevant

Selbstschutz des Ersthelfers: nicht relevant

4.2. Wichtigste akute oder verzögert auftretende Symptome und Wirkungen

- Symptome:** Bisher keine Symptome bekannt.
- Gefahren:** nicht relevant

4.3. Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung

- Hinweise für den Arzt:** Symptomatische Behandlung.
- Spezialbehandlung:** Symptomatische Behandlung.

ABSCHNITT 5: Maßnahmen zur Brandbekämpfung

5.1. Löschmittel

- Geeignete Löschmittel:** Wassersprühstrahl. Kohlendioxid (CO₂). Schaum. Löschpulver.
- Ungeeignete Löschmittel:** Wasservollstrahl.

5.2. Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren

Im Brandfall können entstehen: Kohlenmonoxid. Kohlendioxid. Kohlenwasserstoffe.
Bildung explosiver Staub-Luftgemische möglich.

5.3. Hinweise für die Brandbekämpfung

Allgemeine Hinweise
nicht relevant

Besondere Schutzausrüstung bei der Brandbekämpfung:
Im Brandfall: Umgebungsluftunabhängiges Atemschutzgerät verwenden.

Zusätzliche Angaben

Brandklasse A: Brände fester Stoffe, hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Glutbildung verbrennen.

ABSCHNITT 6: Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

6.1. Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren

Nicht für Notfälle geschultes Personal:
Staubentwicklung vermeiden.

Einsatzkräfte: Bei Einwirkungen von Dämpfen, Stäuben und Aerosolen ist Atemschutz zu verwenden.
Staubentwicklung vermeiden.
Siehe Schutzmaßnahmen unter Punkt 7 und 8.

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

6.2. Umweltschutzmaßnahmen

Es sind keine besonderen Umweltschutzmaßnahmen erforderlich.

6.3. Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung

Mechanisch aufnehmen. Staubentwicklung vermeiden.

6.4. Verweis auf andere Abschnitte

Nicht trocken fegen, wenn Staub oder statische Aufladung entstehen können.

ABSCHNITT 7: Handhabung und Lagerung

7.1. Schutzmaßnahmen zur sicheren Handhabung

Hinweise zum sicheren Umgang

Staubentwicklung vermeiden.

Schutzmaßnahmen: Bei offenem Umgang sind nach Möglichkeit Vorrichtungen mit lokaler Absaugung zu verwenden.

Alle Arbeitsverfahren sind grundsätzlich so zu gestalten, dass folgendes ausgeschlossen ist: Einatmen von Stäuben/Partikel

Technische Maßnahmen

Bei Abfüll-, Umfüll- und Dosierarbeiten sowie bei Probenahmen sind nach Möglichkeit zu verwenden: Vorrichtungen mit lokaler Absaugung.

Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz

Das Produkt ist: Brennbar.

Staubexplosionsfähig, Staubexplosionsklasse: St 1

Von Zündquellen fernhalten - Nicht rauchen.

Von heißen Oberflächen fernhalten.

Weitere Angaben

nicht relevant

7.2. Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten

Technische Maßnahmen und Lagerbedingungen

nicht relevant

Verpackungsmaterialien

nicht relevant

Anforderungen an Lagerräume und Behälter

nicht relevant

Zusammenlagerungshinweise

nicht relevant

Lagerklasse: 11 Brennbare Feststoffe

Weitere Angaben zu Lagerbedingungen

Schützen gegen: Feuchtigkeit.

Relative Luftfeuchtigkeit (%): nicht relevant

Lagertemperatur: nicht relevant

Lagerstabilität: mindestens 3 Jahre

Maximale Lagerdauer: nicht relevant

7.3. Spezifische Endanwendungen

nicht relevant

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

ABSCHNITT 8: Begrenzung und Überwachung der Exposition / Persönliche Schutzausrüstungen

8.1. Zu überwachende Parameter

Arbeitsplatzgrenzwert

Stoff:	CAS-Nr.:	Quelle:	Arbeitsplatzgrenzwert:	Spitzenbegrenzung:	Bemerkung:
Weichholzstaub	nicht relevant	TRGS 553	2 mg/m ³		AGW DE
Allgemeiner Staubgrenzwert	nicht relevant	TRGS 900	1,25 mg/m ³ alveolengängige Fraktion 10 mg/m ³ einatembare Fraktion	2 (II)	AGW DE

Stoff mit einem gemeinschaftlichen Grenzwert (EU) für die Exposition am Arbeitsplatz
nicht relevant

DNEL-/PNEC-Werte

DNEL Wert

nicht relevant

PNEC Wert

nicht relevant

Risikomanagementmaßnahmen gemäß verwendeten Control-Banding-Ansatzes

nicht relevant

Zusätzliche Hinweise

nicht relevant

8.2. Begrenzung und Überwachung der Exposition

Begrenzung und Überwachung der Exposition am Arbeitsplatz

Wenn technische Absaug- oder Lüftungsmaßnahmen nicht möglich oder unzureichend sind, muss Atemschutz getragen werden.

Schutz- und Hygienemaßnahmen

Am Arbeitsplatz nicht essen, trinken, rauchen, schnupfen.

Persönliche Schutzausrüstung

Atemschutz ist erforderlich bei: Grenzwertüberschreitung

Atemschutz

Geeignetes Atemschutzgerät: filtrierende Halbmaske gemäß DIN EN 149.

Halbmaske oder Viertelmanke: Maximale Einsatzkonzentration für Stoffe mit Grenzwerten:

P1-Filter bis max. 4-facher Grenzwert;

P2-Filter bis max. 10-facher Grenzwert;

P3-Filter bis max. 30-facher Grenzwert.

Die Tragezeitbegrenzungen nach GefStoffV in Verbindung mit den Regeln für den Einsatz von Atemschutzgeräten (BGR 190) sind zu beachten.

Die Atemschutzfilterklasse ist unbedingt der maximalen Schadstoffkonzentration (Gas/ Dampf/ Aerosol/ Partikel) anzupassen, die beim Umgang mit dem Produkt entstehen kann.

Bei Konzentrationsüberschreitung muss Isoliergerät benutzt werden!

Handschutz

nicht erforderlich

Augen-/Gesichtsschutz

Staubschutzbrille

Körperschutz

nicht erforderlich

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

Begrenzung und Überwachung der Umweltexposition

Siehe Kapitel 7.

Es sind keine darüber hinausgehenden Maßnahmen erforderlich.

Begrenzung und Überwachung der Verbraucherexposition

nicht relevant

Expositionsszenario

nicht relevant

ABSCHNITT 9: Physikalische und chemische Eigenschaften

9.1. Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften

Aussehen

Aggregatzustand: Pulver
Farbe: beige
Geruch: geruchlos
Geruchsschwelle: nicht relevant

Sicherheitsrelevante Basisdaten

Parameter		Einheit	Bemerkung
Dichte:	ca.	1,5 g/cm ³	
Schüttdichte:		140 - 200 kg/m ³	
pH-Wert:		4,5 - 6,5	
Schmelzpunkt/Gefrierpunkt:			nicht anwendbar
Siedebeginn und Siedebereich:			nicht anwendbar
Flammpunkt:			nicht anwendbar
Entzündbarkeit (fest, gasförmig):			nicht relevant
Explosionsgefährlichkeit:			staubexplosionsfähig
Untere Explosionsgrenze:		30 g/m ³	
Obere Explosionsgrenze:		11.000 g/m ³	
Zündtemperatur:			nicht bestimmt
Zersetzungstemperatur:			nicht bestimmt
Brandförderndes Potenzial:			nicht relevant
Dampfdruck:			nicht anwendbar
Dampfdichte:			nicht anwendbar
Verdampfungsgeschwindigkeit:			nicht anwendbar
Wasserlöslichkeit:			unlöslich
Fettlöslichkeit:			unlöslich
Löslich in:	:		nicht relevant
Verteilungskoeffizient n-Octanol/Wasser:			nicht anwendbar
Viskosität:			nicht anwendbar
Lösemitteltrennprüfung:			nicht anwendbar
Lösemittelgehalt:		0 %	

9.2. Sonstige Angaben

Staubexplosionsklasse: St 1

Mindestzündenergie in mJ: > 30

Mindestzündtemperatur einer Staubwolke (C°): 400

Entzündbarkeit und Brennverhalten von abgelagerten Stäuben: Brennzahl (BZ) 5

Mindestzündtemperatur einer 5-mm-Staubschicht (Glimmtemperatur) ≥ 330 °C

Maximaler Explosionsdruck in bar: < 9,5

KSt-Wert in bar m s⁻¹: < 200

Das Produkt wurde nicht geprüft.

Die Aussage ist von Produkten ähnlicher Zusammensetzung abgeleitet.

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

ABSCHNITT 10: Stabilität und Reaktivität

10.1. Reaktivität

nicht relevant

10.2. Chemische Stabilität

nicht relevant

10.3. Möglichkeit gefährlicher Reaktionen

nicht relevant

10.4. Zu vermeidende Bedingungen

Dieses Material ist brennbar und kann durch Hitze, Funken, Flammen oder andere Zündquellen (z.B. statische Elektrizität, Zündflammen, mechanische/elektrische Ausrüstung) entzündet werden. Zersetzung erfolgt ab Temperaturen von: 200 °C

10.5. Unverträgliche Materialien

nicht relevant

10.6. Gefährliche Zersetzungsprodukte

Kohlenmonoxid. Kohlendioxid.

Zusätzliche Hinweise

nicht relevant

ABSCHNITT 11: Toxikologische Angaben

11.1. Angaben zu toxikologischen Wirkungen

nicht relevant

Akute Toxizität

nicht relevant

Spezifische Symptome im Tierversuch

nicht relevant

Reizung und Ätzwirkung

Reizwirkung an der Haut

nicht reizend

Reizwirkung am Auge

nicht reizend

Reizwirkung der Atemwege

nicht reizend

Ätzwirkung

nicht ätzend

Sensibilisierung

nicht sensibilisierend

Toxizität nach wiederholter Aufnahme (subakut, subchronisch, chronisch)

nicht relevant

CMR-Wirkungen (krebserzeugende, erbgutverändernde und fortpflanzungsgefährdende Wirkung)

Karzinogenität

Dieser Stoff ist eingestuft als Carc. 2, H351

Keimzellmutagenität

nicht relevant

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

Reproduktionstoxizität
nicht relevant

Allgemeine Bemerkungen
nicht relevant

Erfahrungen aus der Praxis/beim Menschen
nicht relevant

Sonstige Beobachtungen
nicht relevant

Sonstige Angaben
nicht relevant

ABSCHNITT 12: Umweltbezogene Angaben

12.1. Toxizität
nicht relevant

Ökotoxizität
nicht relevant

12.2. Persistenz und Abbaubarkeit
nicht persistent

12.3. Bioakkumulationspotenzial
Kein Hinweis auf Bioakkumulationspotential.

12.4. Mobilität im Boden
nicht relevant

12.5. Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung
Dieser Stoff erfüllt nicht die Kriterien für eine Einstufung als PBT oder vPvB.

12.6. Andere schädliche Wirkungen
nicht relevant

Weitere ökologische Hinweise
Negative ökologische Wirkungen sind nach heutigem Kenntnisstand nicht zu erwarten.

Sonstige Hinweise
nicht relevant

ABSCHNITT 13: Hinweise zur Entsorgung

13.1. Verfahren der Abfallbehandlung
Sachgerechte Entsorgung/Produkt
Entsorgung gemäß den behördlichen Vorschriften.

Sachgerechte Entsorgung / Verpackung
Vollständig entleerte Verpackungen können einer Verwertung zugeführt werden.

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

Vorschlagsliste für Abfallschlüssel/Abfallbezeichnungen gemäß EAKV

Abfallschlüssel Produkt: 03 01 04 - Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und
Furniere, die gefährliche Stoffe enthalten

Abfallschlüssel Verpackung: 15 01 06 - gemischte Verpackungen

Bemerkung

Die Zuordnung der Abfallschlüsselnummern/Abfallbezeichnungen ist entsprechend EAVK branchen- und prozessspezifisch durchzuführen.

ABSCHNITT 14: Angaben zum Transport

14.1. UN-Nummer

nicht relevant

14.2. Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung

nicht relevant

14.3. Transportgefahrenklassen

nicht relevant

14.4. Verpackungsgruppe

nicht relevant

14.5. Umweltgefahren

nicht relevant

14.6. Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender

Landtransport (ADR/RID)

Bemerkung: Kein Gefahrgut im Sinne dieser Transportvorschriften.

Seeschifftransport (IMDG)

Remark: Not a hazardous material with respect to these transportation regulations.

Lufttransport (ICAO-TI / IATA-DGR)

Remark: Not a hazardous material with respect to these transportation regulations.

14.7. Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens 73/78 und gemäß IBC-Code

nicht relevant

ABSCHNITT 15: Rechtsvorschriften

Kennzeichnung

Gefahrbestimmende Komponente(n) zur Etikettierung

Holzstaub

Besondere Kennzeichnung bestimmter Zubereitungen

nicht relevant

15.1. Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch

EU-Vorschriften

Angaben zur Richtlinie 1999/13/EG über die Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC-RL)

nicht relevant

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

Verordnung (EG) Nr 2037/2000 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen.
nicht relevant

Verordnung (EG) Nr. 648/2004 über Detergenzien
nicht relevant

Nationale Vorschriften

Die nationalen Rechtsvorschriften sind zusätzlich zu beachten!

Hinweise zur Beschäftigungsbeschränkung

Beschäftigungsbeschränkungen nach der Mutterschutzrichtlinienverordnung (92/85/EWG) für werdende oder stillende Mütter beachten.

Beschäftigungsbeschränkungen nach dem Jugendarbeitsschutzgesetz (94/33/EG) beachten.

Störfallverordnung

nicht relevant

Lagerklasse

11 Brennbare Feststoffe

Wassergefährdungsklasse (WGK)

nicht wassergefährdend

Technische Anleitung Luft (TA-Luft)

Gesamtstaubemissionswert darf nicht überschritten werden (siehe Ziffer 5.2.1).

Sonstige Vorschriften, Beschränkungen und Verbotsverordnungen

Mindestschutzmaßnahmen nach TRGS 500.

15.2. Stoffsicherheitsbeurteilung

Eine Stoffsicherheitsbeurteilung wurde für diese Zubereitung durchgeführt: nein

ABSCHNITT 16: Sonstige Angaben

Wortlaut der R-, H- und EUH-Sätze (Nummer und Volltext)

Gefahrenhinweise

H351 Kann bei Einatmen vermutlich Krebs erzeugen.

R-Sätze

R40 Verdacht auf krebserzeugende Wirkung.

Schulungshinweise

nicht relevant

Empfohlene Einschränkung(en) der Anwendung

nicht relevant

Weitere Informationen

Die Angaben in diesem Sicherheitsdatenblatt entsprechen nach bestem Wissen unseren Erkenntnissen bei Drucklegung. Die Informationen sollen Ihnen Anhaltspunkte für den sicheren Umgang mit dem in diesem Sicherheitsdatenblatt genannten Produkt bei Lagerung, Verarbeitung, Transport und Entsorgung geben. Die Angaben sind nicht übertragbar auf andere Produkte. Soweit das Produkt mit anderen Materialien vermengt, vermischt oder verarbeitet wird, oder einer Bearbeitung unterzogen wird, können die Angaben in diesem Sicherheitsdatenblatt, soweit sich hieraus nicht ausdrücklich etwas anderes ergibt, nicht auf das so gefertigte neue Material übertragen werden.

Änderungsdokumentation

| Daten gegenüber der Vorversion geändert

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Cellulose

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)
ARBOCEL C 100

Bearbeitungsdatum: 23.02.2015

Wichtige Literaturangaben und Datenquellen

Angaben stammen aus Nachschlagewerken und der Literatur.

GESTIS-Stoffdatenbank

RL 67/548/EEG

RL 1999/45/EG

TRGS 553

TRGS 900

TRGS 905

Verordnung (EG) 1272/2008 (CLP)

EFBWW (European Federation of Building and Woodworkers), Broschüre „Weniger Staub“

Abkürzungen und Akronyme

nicht relevant

Anhang A - Produktdatenblätter

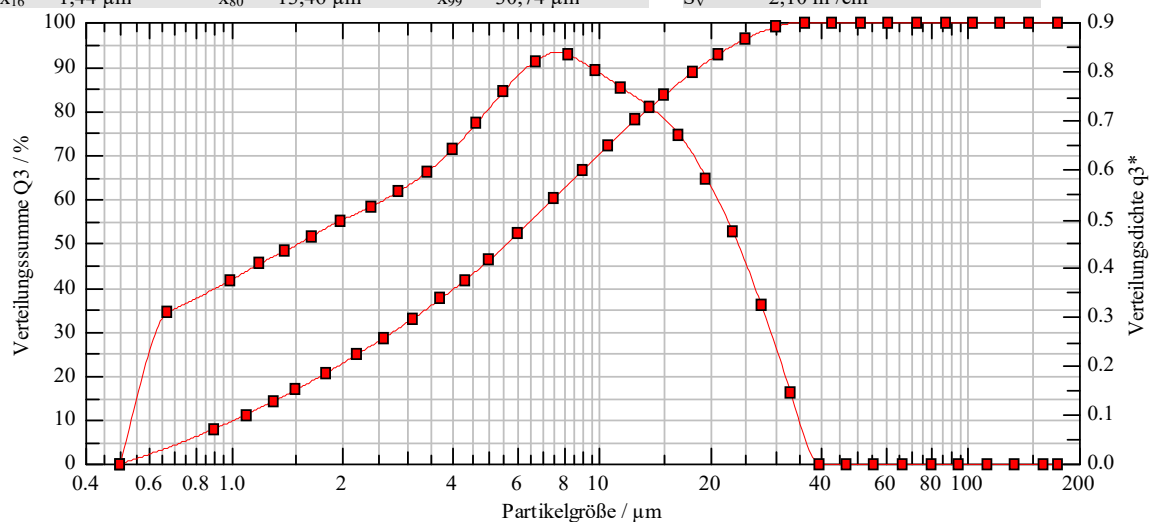
Zusatzstoff: Kalksteinmehl

HELOS (H1873) & SUCELL, R3: 0.5/0.9...175µm

2015-03-18, 15:21:37,750

Kalksteinmehl

$x_{10} = 1,03 \mu\text{m}$ $x_{50} = 5,66 \mu\text{m}$ $x_{90} = 18,90 \mu\text{m}$ **SMD = 2,86 µm** **VMD = 7,98 µm**
 $x_{16} = 1,44 \mu\text{m}$ $x_{80} = 13,46 \mu\text{m}$ $x_{99} = 30,74 \mu\text{m}$ $S_V = 2,10 \text{ m}^2/\text{cm}^3$



Verteilungssumme

$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$
0,90	7,86	3,70	37,33	15,00	83,53	61,00	100,00
1,10	11,11	4,30	41,51	18,00	88,84	73,00	100,00
1,30	14,07	5,00	46,06	21,00	92,73	87,00	100,00
1,50	16,76	6,00	52,07	25,00	96,30	103,00	100,00
1,80	20,42	7,50	60,03	30,00	98,86	123,00	100,00
2,20	24,74	9,00	66,63	36,00	100,00	147,00	100,00
2,60	28,54	10,50	71,99	43,00	100,00	175,00	100,00
3,10	32,77	12,50	77,79	51,00	100,00		

Verteilungsdichte (log.)

$x_m/\mu\text{m}$	q_{3lg}	$x_m/\mu\text{m}$	q_{3lg}	$x_m/\mu\text{m}$	q_{3lg}	$x_m/\mu\text{m}$	q_{3lg}
0,67	0,31	3,39	0,59	13,69	0,73	55,78	0,00
0,99	0,37	3,99	0,64	16,43	0,67	66,73	0,00
1,20	0,41	4,64	0,70	19,44	0,58	79,69	0,00
1,40	0,43	5,48	0,76	22,91	0,47	94,66	0,00
1,64	0,46	6,71	0,82	27,39	0,32	112,56	0,00
1,99	0,50	8,22	0,83	32,86	0,14	134,47	0,00
2,39	0,52	9,72	0,80	39,34	0,00	160,39	0,00
2,84	0,55	11,46	0,77	46,83	0,00		

Produkt: Aluminiumsilikat

DatenBank: >Andere Institute_TUBS<

Probenbezeichnung:

Kalksteinmehl

Benutzerparameter

Bediener: Keie

Dispergierung: 10 min Ultraschallbad

Flüssigkeit: isopropanol

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Kalksteinmehl



Sympatec GmbH
System-Partikel-Technik

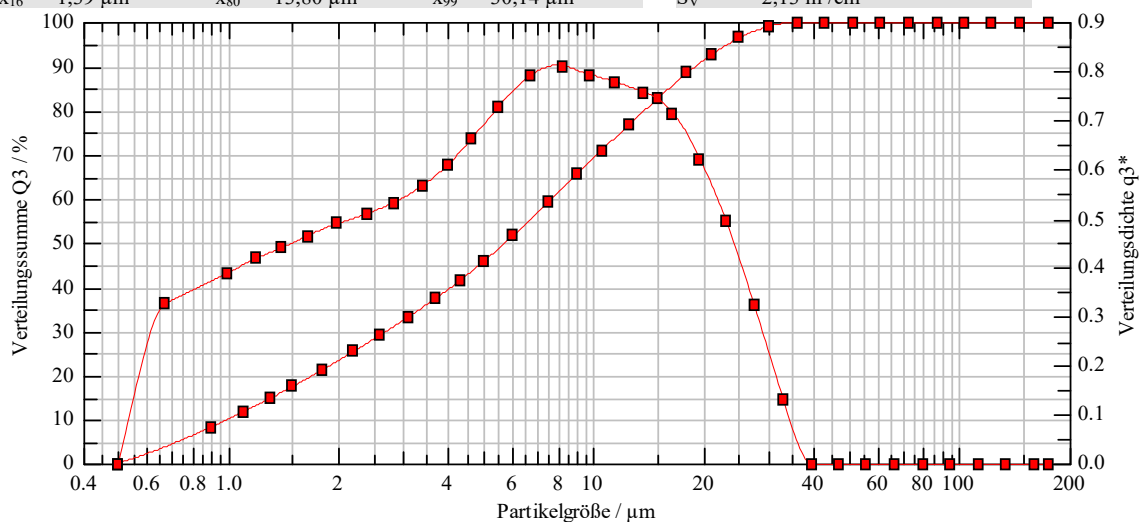
HELOS-Partikelgrößenanalyse
WINDOX 5

HELOS (H1873) & SUCELL, R3: 0.5/0.9...175µm

2015-03-18, 15:07:50.218

Kalksteinmehl

$x_{10} = 1,00 \mu\text{m}$ $x_{50} = 5,72 \mu\text{m}$ $x_{90} = 19,07 \mu\text{m}$ **SMD = 2,81 µm** **VMD = 8,05 µm**
 $x_{16} = 1,39 \mu\text{m}$ $x_{80} = 13,80 \mu\text{m}$ $x_{99} = 30,14 \mu\text{m}$ $S_V = 2,13 \text{ m}^2/\text{cm}^3$



Verteilungssumme

$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$
0,90	8,32	3,70	37,52	15,00	82,87	61,00	100,00
1,10	11,70	4,30	41,50	18,00	88,52	73,00	100,00
1,30	14,74	5,00	45,85	21,00	92,68	87,00	100,00
1,50	17,47	6,00	51,61	25,00	96,43	103,00	100,00
1,80	21,15	7,50	59,27	30,00	98,98	123,00	100,00
2,20	25,41	9,00	65,69	36,00	100,00	147,00	100,00
2,60	29,11	10,50	71,00	43,00	100,00	175,00	100,00
3,10	33,17	12,50	76,88	51,00	100,00		

Verteilungsdichte (log.)

$x_m/\mu\text{m}$	q_3/lg	$x_m/\mu\text{m}$	q_3/lg	$x_m/\mu\text{m}$	q_3/lg	$x_m/\mu\text{m}$	q_3/lg
0,67	0,33	3,39	0,57	13,69	0,76	55,78	0,00
0,99	0,39	3,99	0,61	16,43	0,71	66,73	0,00
1,20	0,42	4,64	0,66	19,44	0,62	79,69	0,00
1,40	0,44	5,48	0,73	22,91	0,50	94,66	0,00
1,64	0,46	6,71	0,79	27,39	0,32	112,56	0,00
1,99	0,49	8,22	0,81	32,86	0,13	134,47	0,00
2,39	0,51	9,72	0,79	39,34	0,00	160,39	0,00
2,84	0,53	11,46	0,78	46,83	0,00		

Produkt: Aluminiumsilikat

DatenBank: >Andere Institute_TUBS<

Probenbezeichnung :

Kalksteinmehl

Benutzerparameter

Bediener: Keie

Dispergierung: 10 min Ultraschallbad

Flüssigkeit: isopropanol

Anhang A - Produktdatenblätter

Zusatzstoff: Kalksteinmehl



Produktdatenblatt

Stand: Juni 2008

Produkt **Kalksteinmehl 402 M**

Herstellwerk Rheinkalk Messinghausen

Chemische Kennwerte:

RFA	CaCO ₃	98,2	Mass.-%
	MgCO ₃	0,8	Mass.-%
	SiO ₂	0,4	Mass.-%
	SO ₃	< 0,01	Mass.-%
	Fe ₂ O ₃	< 0,1	Mass.-%
	Al ₂ O ₃	0,1	Mass.-%

Physikalische Kennwerte:

Luftstrahlsiebung Rückstand 0,040 mm 0,2 Mass.-%

Korngrößenbestimmung durch Laserdiffraktion

Durchgang	1 µm	10,2	Mass.-%
	2 µm	21,9	Mass.-%
	4 µm	37,8	Mass.-%
	8 µm	61,0	Mass.-%
	15 µm	82,2	Mass.-%
	30 µm	96,9	Mass.-%
	40 µm	99,8	Mass.-%
Durchmesser	50 % (D ₅₀)	5,9	µm
	90 % (D ₉₀)	20,1	µm

Weißgehalt (nach Dr. Lange LFM1)

Y-Filter (grün) 75,5

Alle Daten sind Richtwerte mit vorkommens- und produktionsbedingter Toleranz.

Rheinkalk Messinghausen GmbH & Co. KG
Warburger Straße 23 · 59929 Brilon
Telefon: 02963 9669-0 · Telefax: 02963 9669-40
E-Mail: info@rheinkalk.de · www.rheinkalk.de

Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Cire LM-33



Seite: 1/7

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)

Druckdatum: 06.10.2017

Versionsnummer 1.0

überarbeitet am: 06.10.2017

ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs beziehungsweise des Gemischs und des Unternehmens

1.1 Produktidentifikator

Handelsname: Pieri Cire LM-33

1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird:

Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs: Betonzusatzmitteln

Identifizierte Verwendungen abgeraten: Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt

Hersteller/Lieferant:

GCP Produits de Construction SAS
ZA des Foulletons
39140 Larnaud

Tel : +(33) 3 84 48 48 60

Fax : +(33) 3 84 48 48 61

www.gcpat.com

Auskunftgebender Bereich: msds.gcp@gcpat.com

ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren

2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs

Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 Das Produkt ist gemäß CLP-Verordnung nicht eingestuft.

2.2 Kennzeichnungselemente

Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 Nicht geregelt

Gefahrenpiktogramme Nicht geregelt

Signalwort Nicht geregelt

Gefahrenhinweise Nicht geregelt

Zusätzliche Angaben:

Sicherheitsdatenblatt auf Anfrage erhältlich.

2.3 Sonstige Gefahren

Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung

PBT: Nicht anwendbar.

vPvB: Nicht anwendbar.

ABSCHNITT 3: Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen

3.2 Chemische Charakterisierung: Gemische

Gefährliche Inhaltsstoffe:

CAS: 61791-53-5	Amines, N-tallow alkyltrimethylènedi-, oleates	1-<3%
EINECS: 263-186-4	STOT RE 2, H373	
	Aquatic Acute 1, H400; Aquatic Chronic 2, H411 Skin Irrit. 2, H315; Eye Irrit. 2, H319	

(Fortsetzung auf Seite 2)


Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Cire LM-33

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 2/7
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017
Handelsname: Pieri Cire LM-33		
(Fortsetzung von Seite 1)		
ABSCHNITT 4: Erste-Hilfe-Maßnahmen		
4.1 Beschreibung der Erste-Hilfe-Maßnahmen Allgemeine Hinweise: Bei Unwohlsein ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen. Nach Einatmen: Keine besonderen Maßnahmen erforderlich. Nach Hautkontakt: Mit viel Wasser und Seife waschen. Nach Augenkontakt: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser ausspülen. Nach Verschlucken: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen. 4.2 Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar. 4.3 Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.		
ABSCHNITT 5: Maßnahmen zur Brandbekämpfung		
5.1 Löschmittel Geeignete Löschmittel: CO ₂ , Löschpulver oder Wassersprühstrahl. Größeren Brand mit Wassersprühstrahl bekämpfen. 5.2 Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar. 5.3 Hinweise für die Brandbekämpfung Besondere Schutzausrüstung: Umgebungsluftunabhängiges Atemschutzgerät tragen. Weitere Angaben: Kontaminiertes Löschwasser getrennt sammeln, darf nicht in die Kanalisation gelangen.		
ABSCHNITT 6: Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung		
6.1 Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren Schutzausrüstung tragen. Ungeschützte Personen fernhalten. 6.2 Umweltschutzmaßnahmen: Bei Eindringen in Gewässer oder Kanalisation zuständige Behörden benachrichtigen. 6.3 Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung: Für ausreichende Lüftung sorgen. Mit flüssigkeitsbindendem Material (Sand, Kieselgur, Säurebinder, Universalbinder, Sägemehl) aufnehmen. In geeigneten Behältern der Rückgewinnung oder Entsorgung zuführen. 6.4 Verweis auf andere Abschnitte Informationen zur sicheren Handhabung siehe Abschnitt 7. Informationen zur persönlichen Schutzausrüstung siehe Abschnitt 8. Informationen zur Entsorgung siehe Abschnitt 13.		
ABSCHNITT 7: Handhabung und Lagerung		
7.1 Schutzmaßnahmen zur sicheren Handhabung Bei Gebrauch nicht essen, trinken oder rauchen. An einem gut belüfteten Ort aufbewahren. Behälter dicht verschlossen halten. Nur im Originalbehälter aufbewahren.		
(Fortsetzung auf Seite 3)		

Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Cire LM-33

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 3/7
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017
Handelsname: Pieri Cire LM-33		
<div style="text-align: right;">(Fortsetzung von Seite 2)</div> <p>Nur im Freien oder in gut belüfteten Räumen verwenden.</p> <p>Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz: Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.</p> <p>7.2 Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten</p> <p>Lagerung:</p> <p>Zusammenlagerungshinweise: Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.</p> <p>Weitere Angaben zu den Lagerbedingungen:</p> <p>Vor Frost schützen.</p> <p>An einem trockenen Ort aufbewahren.</p> <p>Kühl halten.</p> <p>Lagerklasse:</p> <p>Klassifizierung nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV): -</p> <p>7.3 Spezifische Endanwendungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p>		
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;">ABSCHNITT 8: Begrenzung und Überwachung der Exposition/Persönliche Schutzausrüstungen</div> <p>Zusätzliche Hinweise zur Gestaltung technischer Anlagen: Keine weiteren Angaben, siehe Abschnitt 7.</p> <p>8.1 Zu überwachende Parameter</p> <p>Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten:</p> <p>Das Produkt enthält keine relevanten Mengen von Stoffen mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten.</p> <p>Zusätzliche Hinweise: Als Grundlage dienen die bei der Erstellung gültigen Listen.</p> <p>8.2 Begrenzung und Überwachung der Exposition</p> <p>Persönliche Schutzausrüstung:</p> <p>Allgemeine Schutz- und Hygienemaßnahmen:</p> <p>Die üblichen Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Chemikalien sind zu beachten.</p> <p>Atemschutz:</p> <p>Exposition durch Inhaltsstoffe mit Kontrollparametern am Arbeitsplatz kontrollieren, falls oben erwähnt. Falls keine Inhaltsstoffe aufgelistet sind, ist Atemschutz grundsätzlich nicht notwendig.</p> <p>Wenn Expositionslimits aufgeführt sind und überschritten werden könnten, sind für die aufgeführten Inhaltsstoffe geeignete Atemschutzausrüstung und Filterarten zu verwenden (NIOSH, CEN, etc.).</p> <p>Handschutz: Schutzhandschuhe</p> <p>Handschuhmaterial Handschuhe aus Gummi.</p> <p>Durchdringungszeit des Handschuhmaterials</p> <p>Die genaue Durchdringungszeit ist beim Schutzhandschuhhersteller zu erfahren und einzuhalten.</p> <p>Augenschutz:</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"><p>Schutzbrille mit Seitenschutz tragen.</p></div> <p>Körperschutz:</p> <p>Vorgeschriebene persönliche Schutzausrüstung verwenden.</p> <p>Kontaminierte Kleidung ausziehen.</p>		

(Fortsetzung auf Seite 4)


Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Cire LM-33

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 4/7
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017
Handelsname: Pieri Cire LM-33		
(Fortsetzung von Seite 3)		
ABSCHNITT 9: Physikalische und chemische Eigenschaften		
9.1 Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften		
Allgemeine Angaben		
Aussehen:		
Form:	Pastös	
Farbe:	Hellgelb	
Geruch:	Charakteristisch	
Geruchsschwelle:	Nicht bestimmt.	
pH-Wert (-):	Nicht bestimmt.	
Zustandsänderung:		
Schmelzpunkt/Gefrierpunkt:	Nicht bestimmt.	
Siedebeginn und Siedebereich:	>150 °C	
Flammpunkt:	>100 °C	
Entzündbarkeit (fest, gasförmig):	Nicht anwendbar.	
Zündtemperatur:	300 °C	
Zersetzungstemperatur:	Nicht bestimmt.	
Selbstentzündungstemperatur:	Nicht bestimmt.	
Explosive Eigenschaften:	Das Produkt ist nicht explosionsgefährlich.	
Explosionsgrenzen:		
Untere:	Nicht bestimmt.	
Obere:	Nicht bestimmt.	
VOC Inhalt:	Nicht bestimmt.	
Dampfdruck:		
Dichte bei 20 °C:		
Relative Dichte		
Dampfdichte		
Verdampfungsgeschwindigkeit		
Löslichkeit in / Mischbarkeit mit		
Wasser:		
Verteilungskoeffizient: n-Octanol/Wasser:		
Viskosität:		
Dynamisch:		
Kinematisch:		
9.2 Sonstige Angaben		
Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.		
ABSCHNITT 10: Stabilität und Reaktivität		
10.1 Reaktivität Stabil bei Umgebungstemperatur.		
10.2 Chemische Stabilität		
Thermische Zersetzung / zu vermeidende Bedingungen: Keine Zersetzung bei bestimmungsgemäßer Verwendung.		
10.3 Möglichkeit gefährlicher Reaktionen Keine gefährlichen Reaktionen bekannt.		
10.4 Zu vermeidende Bedingungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.		
10.5 Unverträgliche Materialien: Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.		
10.6 Gefährliche Zersetzungsprodukte: Kohlenmonoxid und Kohlendioxid		
ABSCHNITT 11: Toxikologische Angaben		
11.1 Angaben zu toxikologischen Wirkungen		
Akute Toxizität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.		
(Fortsetzung auf Seite 5)		

Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Cire LM-33

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 5/7										
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017										
Handelsname: Pieri Cire LM-33												
<div style="text-align: right; font-size: small;">(Fortsetzung von Seite 4)</div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><td colspan="2">Einstufungsrelevante LD/LC50-Werte:</td></tr><tr><td colspan="2">61791-53-5 Amines, N-tallow alkyltrimethylenedi-, oleates</td></tr><tr><td>LC50, 96h</td><td>>0,1-1 mg/l (f2) (Test Guideline 203)</td></tr></table> <p>Primäre Reizwirkung: Ätz-/Reizwirkung auf die Haut Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Schwere Augenschädigung/-reizung Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Sensibilisierung der Atemwege/Haut Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Keimzell-Mutagenität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Karzinogenität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Reproduktionstoxizität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Spezifische Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Spezifische Zielorgan-Toxizität bei wiederholter Exposition Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Aspirationsgefahr Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p>			Einstufungsrelevante LD/LC50-Werte:		61791-53-5 Amines, N-tallow alkyltrimethylenedi-, oleates		LC50, 96h	>0,1-1 mg/l (f2) (Test Guideline 203)				
Einstufungsrelevante LD/LC50-Werte:												
61791-53-5 Amines, N-tallow alkyltrimethylenedi-, oleates												
LC50, 96h	>0,1-1 mg/l (f2) (Test Guideline 203)											
ABSCHNITT 12: Umweltbezogene Angaben												
<p>12.1 Toxizität</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><td colspan="2">Aquatische Toxizität:</td></tr><tr><td colspan="2">61791-53-5 Amines, N-tallow alkyltrimethylenedi-, oleates</td></tr><tr><td>EC10</td><td>>1 mg/l (daphnia magna)</td></tr><tr><td>EC50, 72h</td><td>>0,01-0,1 mg/l (algae)</td></tr><tr><td>EC50, 48h</td><td>>0,1-1 mg/l (daphnia magna)</td></tr></table> <p>12.2 Persistenz und Abbaubarkeit Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar. 12.3 Bioakkumulationspotenzial Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar. 12.4 Mobilität im Boden Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar. Weitere ökologische Hinweise: Allgemeine Hinweise: Wassergefährdungsklasse 3 (Selbsteinstufung): stark wassergefährdend Nicht in das Grundwasser, in Gewässer oder in die Kanalisation gelangen lassen, auch nicht in kleinen Mengen. Trinkwassergefährdung bereits beim Auslaufen geringster Mengen in den Untergrund. 12.5 Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung PBT: Nicht anwendbar. vPvB: Nicht anwendbar. 12.6 Andere schädliche Wirkungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p>			Aquatische Toxizität:		61791-53-5 Amines, N-tallow alkyltrimethylenedi-, oleates		EC10	>1 mg/l (daphnia magna)	EC50, 72h	>0,01-0,1 mg/l (algae)	EC50, 48h	>0,1-1 mg/l (daphnia magna)
Aquatische Toxizität:												
61791-53-5 Amines, N-tallow alkyltrimethylenedi-, oleates												
EC10	>1 mg/l (daphnia magna)											
EC50, 72h	>0,01-0,1 mg/l (algae)											
EC50, 48h	>0,1-1 mg/l (daphnia magna)											
ABSCHNITT 13: Hinweise zur Entsorgung												
<p>13.1 Verfahren der Abfallbehandlung</p> <p>Empfehlung:</p> <div style="display: flex; align-items: center;"><div style="text-align: center; margin-right: 10px;"></div><div>Darf nicht zusammen mit Hausmüll entsorgt werden. Nicht in die Kanalisation gelangen lassen.</div></div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><td colspan="2">Europäischer Abfallkatalog</td></tr><tr><td>16 00 00</td><td>ABFÄLLE, DIE NICHT ANDERSWO IM VERZEICHNIS AUFGEFÜHRT SIND</td></tr></table> <div style="text-align: right; font-size: small;">(Fortsetzung auf Seite 6)</div>			Europäischer Abfallkatalog		16 00 00	ABFÄLLE, DIE NICHT ANDERSWO IM VERZEICHNIS AUFGEFÜHRT SIND						
Europäischer Abfallkatalog												
16 00 00	ABFÄLLE, DIE NICHT ANDERSWO IM VERZEICHNIS AUFGEFÜHRT SIND											

Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Cire LM-33

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 6/7														
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017														
Handelsname: Pieri Cire LM-33																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><td style="width: 15%;">16 03 00</td><td>Fehlchargen und ungebrauchte Erzeugnisse</td><td style="text-align: right;">(Fortsetzung von Seite 5)</td></tr><tr><td>16 03 03*</td><td>anorganische Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten</td><td></td></tr></table> <p>Ungereinigte Verpackungen:</p> <p>Empfehlung: Entsorgung gemäß den behördlichen Vorschriften.</p>			16 03 00	Fehlchargen und ungebrauchte Erzeugnisse	(Fortsetzung von Seite 5)	16 03 03*	anorganische Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten									
16 03 00	Fehlchargen und ungebrauchte Erzeugnisse	(Fortsetzung von Seite 5)														
16 03 03*	anorganische Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten															
ABSCHNITT 14: Angaben zum Transport																
<table style="width: 100%;"><tr><td style="width: 60%;">14.1 UN-Nummer ADR, ADN, IMDG, IATA</td><td>Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung ADR, ADN, IMDG, IATA</td><td>Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.3 Transportgefahrenklassen ADR, ADN, IMDG, IATA Klasse</td><td>Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.4 Verpackungsgruppe ADR, IMDG, IATA</td><td>Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.5 Umweltgefahren:</td><td>Nicht anwendbar.</td></tr><tr><td>14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender</td><td>Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens und gemäß IBC-Code</td><td>Nicht geregelt</td></tr></table>			14.1 UN-Nummer ADR, ADN, IMDG, IATA	Nicht geregelt	14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung ADR, ADN, IMDG, IATA	Nicht geregelt	14.3 Transportgefahrenklassen ADR, ADN, IMDG, IATA Klasse	Nicht geregelt	14.4 Verpackungsgruppe ADR, IMDG, IATA	Nicht geregelt	14.5 Umweltgefahren:	Nicht anwendbar.	14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender	Nicht geregelt	14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens und gemäß IBC-Code	Nicht geregelt
14.1 UN-Nummer ADR, ADN, IMDG, IATA	Nicht geregelt															
14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung ADR, ADN, IMDG, IATA	Nicht geregelt															
14.3 Transportgefahrenklassen ADR, ADN, IMDG, IATA Klasse	Nicht geregelt															
14.4 Verpackungsgruppe ADR, IMDG, IATA	Nicht geregelt															
14.5 Umweltgefahren:	Nicht anwendbar.															
14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender	Nicht geregelt															
14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens und gemäß IBC-Code	Nicht geregelt															
ABSCHNITT 15: Rechtsvorschriften																
<p>15.1 Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch</p> <p>Informationen Mögliche Gefahren siehe Kapitel 2.</p> <p>Richtlinie 2012/18/EU</p> <p>Namentlich aufgeführte gefährliche Stoffe - ANHANG I Keiner der Inhaltsstoffe ist enthalten.</p> <p>Nationale Vorschriften:</p> <p>Wassergefährdungsklasse: WGK 3 (VwVwS Anhang 4 vom 19.05.1999): stark wassergefährdend.</p> <p>15.2 Stoffsicherheitsbeurteilung: Eine Stoffsicherheitsbeurteilung wurde nicht durchgeführt.</p>																
ABSCHNITT 16: Sonstige Angaben																
<p>Die Angaben stützen sich auf den heutigen Stand unserer Kenntnisse, sie stellen jedoch keine Zusicherung von Produkteigenschaften dar und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis.</p> <p>Relevante Sätze</p> <p>H315 Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H319 Verursacht schwere Augenreizung.</p> <p>H373 Kann die Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition.</p> <p>H400 Sehr giftig für Wasserorganismen.</p> <p>H411 Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.</p> <p>Datenblatt ausstellender Bereich:</p> <p>GCP Produits de Construction SAS ZA des Foulletons, 39140 Larnaud</p> <p style="text-align: right;">(Fortsetzung auf Seite 7)</p>																

Pieri® Decobio 310

Trennmittel auf Basis von Pflanzenöl



Beschreibung

Mit weniger als 10 % Lösungsmittel wurde Pieri Decobio 310 entwickelt, um den strengen Anforderungen an Umweltschutz und hygienische Arbeitsbedingungen gerecht zu werden. Die pflanzliche Produktbasis (Menge > 50 %) bietet uns neue Möglichkeiten in der Trennmitteltechnologie hinsichtlich Anwendungssicherheit und Oberflächengüte. Die strenge Kontrolle der Produktrezeptur garantiert hervorragende Arbeitsbedingungen und Qualitätsleistung. Pieri Decobio 310 bildet auf der Schalung einen farblosen, fettarmen Pflanzenölfilm, der sogar die Verteilung des Betons erleichtert und die Blasenabsorption während des Verdichtens unterstützt.


Anwendungen

- Baustelle.
- Fertigteil: ideal für Hallenbedingungen, bei denen normalerweise die Kombination von geringem Luftaustausch und häufigem Sprühen von Schalölen zu unangenehmen, hartnäckigen Gerüchen führt, die zulasten der Sicherheits- und Hygienestandards gehen.
- Kann immer verwendet werden, wenn eine glatte fleck- und blasenfreie Betonoberfläche gewünscht ist. Es ist für den Einsatz in den meisten Bedingungen geeignet. Geeignet für beheizte Schalungen bis zu 60 °C. Bitte kontaktieren Sie uns bei höheren Temperaturen.
- Pieri Decobio 310 ist für das Betonieren bei kalten Temperaturen und schwierigen Verdichtungsbedingungen entwickelt worden. Es eignet sich immer dann, wenn die Schalhaut sehr geschlossen ist und dadurch die Haftung des Trennmittels beim Verdichten beeinträchtigt werden kann.
- Unter bestimmten Bedingungen kann Pieri Decobio 310 auch bei der Direktentschalung verwendet werden.

Gebrauchsanweisung

Kann mit einem Sprühgerät auf alle Arten von Formen und Schalungen aufgetragen werden, Stahl, kunststoffbeschichtetes oder versiegeltes Sperrholz oder Polyester. Dank seiner niedrigen Viskosität kann es in einem sehr dünnen Film aufgebracht werden. Äußerst sparsam, Verbrauch 1 Liter / 40 m² und mehr.

Vorteile

-  : Sicherheitsdatenblatt ohne Gefahrenhinweise oder Sicherheitskennzeichen auf dem Endprodukt, entsprechend der CLP-Verordnung vom 01.06.2015.
- Nahezu geruchlos
- Nicht brennbar
- Sehr leicht biologisch abbaubar (biologisch abgebaut wird innerhalb von 28 Tagen > 60 % gemäß NF EN ISO 9408 OCDE 301 F Standard)
- Beeinflusst nachträgliche Beschichtungen wie z. B. Putz oder Farbe nicht: CERIB-Prüfbericht 5830.
- Enthält Additive zur Vermeidung von Rosten von Metallschalungen

Empfehlungen

Bitte berücksichtigen Sie, dass Pieri Decobio 310 auf allen damit besprühten Gegenständen einen klebrigen Film bildet, wenn es längere Zeit ultraviolett Licht (Sonnenlicht) ausgesetzt ist. Aus diesem Grund sollte nur der Schalungsbereich damit in Kontakt kommen, auf dem anschließen betoniert wird. Andere Schalungsbereiche, Werkzeuge etc. nicht damit benetzen.

Technische Spezifikationen

- Strohgelbe Flüssigkeit
- Konzentration von Pflanzenöl oder Pflanzenölraffinat: > 65 %
- Dichte: 0,88 ± 0,02 bei 20 °C
- Viskosität: 20 ± 5 cSt (Iso 2431 cup N ° 3 bei 20 °C)
- Gefrierpunkt: < -15 °C
- Flammpunkt: 62 °C (Setaflash-Methode)
- Gebrauchsfertig
- Empfohlene Düsen: X 10 oder Flachstrahldüse
- BTM 10.

Lagerung

Das Produkt verschlechtert sich nicht im Laufe der Zeit, sofern es in der Originalverpackung unter den in diesem Datenblatt festgelegten Lagerbedingungen aufbewahrt wird. Konsumieren Sie vorzugsweise vor 5 Jahren. Einhaltung der geltenden Gesetze.

Verpackung

25-Liter-Fass / 220-Liter-Fass / 1000-Liter-Tank / Bulk.

Sicherheit

Keine Vorschriften.
Dieses Produkt muss in der Originalverpackung aufbewahrt werden.
Weitere Informationen finden Sie in unserem Sicherheitsdatenblatt.

Transport

Keine Vorschriften.



Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Decobio 310



Seite: 1/6

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)

Druckdatum: 06.10.2017

Versionsnummer 1.0

überarbeitet am: 06.10.2017

ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs beziehungsweise des Gemischs und des Unternehmens

1.1 Produktidentifikator

Handelsname: *Pieri Decobio 310*

1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird:

Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs: Betonzusatzmitteln

Identifizierte Verwendungen abgeraten: Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt

Hersteller/Lieferant:

GCP Produits de Construction SAS
ZA des Foulletons
39140 Larnaud

Tel : +(33) 3 84 48 48 60

Fax : +(33) 3 84 48 48 61

www.gcpat.com

Auskunftgebender Bereich: msds.gcp@gcpat.com

ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren

2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs

Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 Das Produkt ist gemäß CLP-Verordnung nicht eingestuft.

2.2 Kennzeichnungselemente

Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 Nicht geregelt

Gefahrenpiktogramme Nicht geregelt

Signalwort Nicht geregelt

Gefahrenhinweise Nicht geregelt

Zusätzliche Angaben:

Sicherheitsdatenblatt auf Anfrage erhältlich.

2.3 Sonstige Gefahren

Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung

PBT: Nicht anwendbar.

vPvB: Nicht anwendbar.

ABSCHNITT 3: Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen

3.2 Chemische Charakterisierung: Gemische

Gefährliche Inhaltsstoffe:

EC nummer: 918-481-9	Naphtha (Erdöl), mit Wasserstoff behandelte schwere	Asp. Tox. 1, H304	5-<10%
----------------------	---	-------------------	--------

ABSCHNITT 4: Erste-Hilfe-Maßnahmen

4.1 Beschreibung der Erste-Hilfe-Maßnahmen

Allgemeine Hinweise: Bei Unwohlsein ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen.

(Fortsetzung auf Seite 2)


Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Decobio 310

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 2/6
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017
Handelsname: Pieri Decobio 310		
<div style="text-align: right;">(Fortsetzung von Seite 1)</div> <p>Nach Einatmen: Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.</p> <p>Nach Hautkontakt: Mit viel Wasser und Seife waschen.</p> <p>Nach Augenkontakt: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser ausspülen.</p> <p>Nach Verschlucken: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen.</p> <p>4.2 Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p> <p>4.3 Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p>		
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;">ABSCHNITT 5: Maßnahmen zur Brandbekämpfung</div> <p>5.1 Löschmittel Geeignete Löschmittel: CO₂, Löschpulver oder Wassersprühstrahl. Größeren Brand mit Wassersprühstrahl bekämpfen.</p> <p>5.2 Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p> <p>5.3 Hinweise für die Brandbekämpfung Besondere Schutzausrüstung: Umgebungsluftunabhängiges Atemschutzgerät tragen. Weitere Angaben: Kontaminiertes Löschwasser getrennt sammeln, darf nicht in die Kanalisation gelangen.</p>		
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;">ABSCHNITT 6: Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung</div> <p>6.1 Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren Schutzausrüstung tragen. Ungeschützte Personen fernhalten.</p> <p>6.2 Umweltschutzmaßnahmen: Bei Eindringen in Gewässer oder Kanalisation zuständige Behörden benachrichtigen.</p> <p>6.3 Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung: In geeigneten Behältern der Rückgewinnung oder Entsorgung zuführen.</p> <p>6.4 Verweis auf andere Abschnitte Informationen zur sicheren Handhabung siehe Abschnitt 7. Informationen zur persönlichen Schutzausrüstung siehe Abschnitt 8. Informationen zur Entsorgung siehe Abschnitt 13.</p>		
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;">ABSCHNITT 7: Handhabung und Lagerung</div> <p>7.1 Schutzmaßnahmen zur sicheren Handhabung Bei Gebrauch nicht essen, trinken oder rauchen. An einem gut belüfteten Ort aufbewahren. Behälter dicht verschlossen halten. Nur im Originalbehälter aufbewahren. Nur im Freien oder in gut belüfteten Räumen verwenden. Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz: Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.</p> <p>7.2 Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten Lagerung: Zusammenlagerungshinweise: Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.</p> <div style="text-align: right;">(Fortsetzung auf Seite 3)</div>		

Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Decobio 310

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 3/6												
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017												
Handelsname: Pieri Decobio 310														
<div style="text-align: right;">(Fortsetzung von Seite 2)</div> <p>Weitere Angaben zu den Lagerbedingungen:</p> <p>Vor Frost schützen.</p> <p>An einem trockenen Ort aufbewahren.</p> <p>Kühl halten.</p> <p>Lagerklasse:</p> <p>Klassifizierung nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV): -</p> <p>7.3 Spezifische Endanwendungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p>														
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;">ABSCHNITT 8: Begrenzung und Überwachung der Exposition/Persönliche Schutzausrüstungen</div> <p>Zusätzliche Hinweise zur Gestaltung technischer Anlagen: Keine weiteren Angaben, siehe Abschnitt 7.</p> <p>8.1 Zu überwachende Parameter</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><td colspan="2">Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten:</td></tr><tr><td colspan="2">Naphtha (Erdöl), mit Wasserstoff behandelte schwere</td></tr><tr><td style="width: 15%;">MAK</td><td>Langzeitwert: 300 mg/m³, 50 ml/m³ vgl. Abschn.Xc</td></tr></table> <p>Zusätzliche Hinweise: Als Grundlage dienen die bei der Erstellung gültigen Listen.</p> <p>8.2 Begrenzung und Überwachung der Exposition</p> <p>Persönliche Schutzausrüstung:</p> <p>Allgemeine Schutz- und Hygienemaßnahmen:</p> <p>Die üblichen Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Chemikalien sind zu beachten.</p> <p>Atemschutz:</p> <p>Exposition durch Inhaltsstoffe mit Kontrollparametern am Arbeitsplatz kontrollieren, falls oben erwähnt. Falls keine Inhaltsstoffe aufgelistet sind, ist Atemschutz grundsätzlich nicht notwendig.</p> <p>Wenn Expositionslimits aufgeführt sind und überschritten werden könnten, sind für die aufgeführten Inhaltsstoffe geeignete Atemschutzausrüstung und Filterarten zu verwenden (NIOSH, CEN, etc.).</p> <p>Handschutz: Schutzhandschuhe</p> <p>Handschuhmaterial PVC-Handschuhe.</p> <p>Durchdringungszeit des Handschuhmaterials</p> <p>Die genaue Durchdringungszeit ist beim Schutzhandschuhhersteller zu erfahren und einzuhalten.</p> <p>Augenschutz:</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"><div>Schutzbrille mit Seitenschutz tragen.</div></div> <p>Körperschutz:</p> <p>Vorgeschriebene persönliche Schutzausrüstung verwenden.</p> <p>Kontaminierte Kleidung ausziehen.</p>			Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten:		Naphtha (Erdöl), mit Wasserstoff behandelte schwere		MAK	Langzeitwert: 300 mg/m ³ , 50 ml/m ³ vgl. Abschn.Xc						
Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten:														
Naphtha (Erdöl), mit Wasserstoff behandelte schwere														
MAK	Langzeitwert: 300 mg/m ³ , 50 ml/m ³ vgl. Abschn.Xc													
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;">ABSCHNITT 9: Physikalische und chemische Eigenschaften</div> <p>9.1 Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><td colspan="2">Allgemeine Angaben</td></tr><tr><td colspan="2">Aussehen:</td></tr><tr><td style="width: 40%;">Form:</td><td>Flüssigkeit</td></tr><tr><td>Farbe:</td><td>Gelblich</td></tr><tr><td>Geruch:</td><td>Charakteristisch</td></tr><tr><td>Geruchsschwelle:</td><td>Nicht bestimmt.</td></tr></table> <div style="text-align: right;">(Fortsetzung auf Seite 4)</div>			Allgemeine Angaben		Aussehen:		Form:	Flüssigkeit	Farbe:	Gelblich	Geruch:	Charakteristisch	Geruchsschwelle:	Nicht bestimmt.
Allgemeine Angaben														
Aussehen:														
Form:	Flüssigkeit													
Farbe:	Gelblich													
Geruch:	Charakteristisch													
Geruchsschwelle:	Nicht bestimmt.													

Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Decobio 310

Seite: 4/6

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)

Druckdatum: 06.10.2017

Versionsnummer 1.0

überarbeitet am: 06.10.2017

Handelsname: Pieri Decobio 310

(Fortsetzung von Seite 3)

pH-Wert (-):	Nicht bestimmt.
Zustandsänderung:	
Schmelzpunkt/Gefrierpunkt:	Nicht bestimmt.
Siedebeginn und Siedebereich:	>100 °C
Flammpunkt:	62 °C
Entzündbarkeit (fest, gasförmig):	Nicht anwendbar.
Zündtemperatur:	240 °C
Zersetzungstemperatur:	Nicht bestimmt.
Selbstentzündungstemperatur:	Nicht bestimmt.
Explosive Eigenschaften:	Bei Gebrauch Bildung explosionsfähiger/leichtentzündlicher Dampf/Luft-Gemische möglich.
Explosionsgrenzen:	
Untere:	Nicht bestimmt.
Obere:	Nicht bestimmt.
VOC Inhalt:	Nicht bestimmt.
Dampfdruck:	Nicht bestimmt.
Dichte bei 20 °C:	0,9 g/cm ³
Relative Dichte	Nicht bestimmt.
Dampfdichte	Nicht bestimmt.
Verdampfungsgeschwindigkeit	Nicht bestimmt.
Löslichkeit in / Mischbarkeit mit Wasser:	Nicht mischbar oder schwierig zu mischen.
Verteilungskoeffizient: n-Octanol/Wasser:	Nicht bestimmt.
Viskosität:	
Dynamisch:	Nicht bestimmt.
Kinematisch bei 20 °C:	27 mm ² /s
9.2 Sonstige Angaben	Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

ABSCHNITT 10: Stabilität und Reaktivität

10.1 Reaktivität Stabil bei Umgebungstemperatur.

10.2 Chemische Stabilität

Thermische Zersetzung / zu vermeidende Bedingungen: Keine Zersetzung bei bestimmungsgemäßer Verwendung.

10.3 Möglichkeit gefährlicher Reaktionen Keine gefährlichen Reaktionen bekannt.

10.4 Zu vermeidende Bedingungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

10.5 Unverträgliche Materialien: Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.

10.6 Gefährliche Zersetzungsprodukte: Kohlenmonoxid und Kohlendioxid

ABSCHNITT 11: Toxikologische Angaben

11.1 Angaben zu toxikologischen Wirkungen

Akute Toxizität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Primäre Reizwirkung:

Ätz-/Reizwirkung auf die Haut Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Schwere Augenschädigung/-reizung Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Sensibilisierung der Atemwege/Haut Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Keimzell-Mutagenität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.


Karzinogenität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

Reproduktionstoxizität Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.

(Fortsetzung auf Seite 5)

Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Decobio 310

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 5/6								
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017								
Handelsname: Pieri Decobio 310										
<div style="text-align: right;">(Fortsetzung von Seite 4)</div> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p> <p>Spezifische Zielorgan-Toxizität bei wiederholter Exposition Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p> <p>Aspirationsgefahr Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt.</p>										
ABSCHNITT 12: Umweltbezogene Angaben										
<p>12.1 Toxizität Aquatische Toxizität: Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p> <p>12.2 Persistenz und Abbaubarkeit Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p> <p>12.3 Bioakkumulationspotenzial Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p> <p>12.4 Mobilität im Boden Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p> <p>Weitere ökologische Hinweise: Allgemeine Hinweise: Keine Wassergefährdung bekannt. Wassergefährdungsklasse 1 (Selbsteinstufung): schwach wassergefährdend</p> <p>12.5 Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung PBT: Nicht anwendbar. vPvB: Nicht anwendbar.</p> <p>12.6 Andere schädliche Wirkungen Keine weiteren relevanten Informationen verfügbar.</p>										
ABSCHNITT 13: Hinweise zur Entsorgung										
<p>13.1 Verfahren der Abfallbehandlung Empfehlung:</p> <div style="display: flex; align-items: center;"><div style="text-align: center; margin-right: 10px;"></div><p>Darf nicht zusammen mit Hausmüll entsorgt werden. Nicht in die Kanalisation gelangen lassen.</p></div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"><tr><th colspan="2">Europäischer Abfallkatalog</th></tr><tr><td style="width: 15%;">16 00 00</td><td>ABFÄLLE, DIE NICHT ANDERSWO IM VERZEICHNIS AUFGEFÜHRT SIND</td></tr><tr><td>16 03 00</td><td>Fehlchargen und ungebrauchte Erzeugnisse</td></tr><tr><td>16 03 03*</td><td>anorganische Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten</td></tr></table> <p>Ungereinigte Verpackungen: Empfehlung: Entsorgung gemäß den behördlichen Vorschriften.</p>			Europäischer Abfallkatalog		16 00 00	ABFÄLLE, DIE NICHT ANDERSWO IM VERZEICHNIS AUFGEFÜHRT SIND	16 03 00	Fehlchargen und ungebrauchte Erzeugnisse	16 03 03*	anorganische Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten
Europäischer Abfallkatalog										
16 00 00	ABFÄLLE, DIE NICHT ANDERSWO IM VERZEICHNIS AUFGEFÜHRT SIND									
16 03 00	Fehlchargen und ungebrauchte Erzeugnisse									
16 03 03*	anorganische Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten									
ABSCHNITT 14: Angaben zum Transport										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><td style="width: 40%;">14.1 UN-Nummer ADR, ADN, IMDG, IATA</td><td style="text-align: right;">Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung ADR, ADN, IMDG, IATA</td><td style="text-align: right;">Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.3 Transportgefahrenklassen ADR, ADN, IMDG, IATA Klasse</td><td style="text-align: right;">Nicht geregelt</td></tr></table>			14.1 UN-Nummer ADR, ADN, IMDG, IATA	Nicht geregelt	14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung ADR, ADN, IMDG, IATA	Nicht geregelt	14.3 Transportgefahrenklassen ADR, ADN, IMDG, IATA Klasse	Nicht geregelt		
14.1 UN-Nummer ADR, ADN, IMDG, IATA	Nicht geregelt									
14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung ADR, ADN, IMDG, IATA	Nicht geregelt									
14.3 Transportgefahrenklassen ADR, ADN, IMDG, IATA Klasse	Nicht geregelt									
(Fortsetzung auf Seite 6)										

Anhang A - Produktdatenblätter

Trennmittel: Pieri Decobio 310

Sicherheitsdatenblatt gemäß 453/2010/EC & 1272/2008/EC (CLP)		Seite: 6/6								
Druckdatum: 06.10.2017	Versionsnummer 1.0	überarbeitet am: 06.10.2017								
Handelsname: Pieri Decobio 310										
<div style="text-align: right; font-size: small;">(Fortsetzung von Seite 5)</div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><td style="width: 50%;">14.4 Verpackungsgruppe ADR, IMDG, IATA</td><td style="width: 50%;">Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.5 Umweltgefahren:</td><td>Nicht anwendbar.</td></tr><tr><td>14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender</td><td>Nicht geregelt</td></tr><tr><td>14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens und gemäß IBC-Code</td><td>Nicht geregelt</td></tr></table>			14.4 Verpackungsgruppe ADR, IMDG, IATA	Nicht geregelt	14.5 Umweltgefahren:	Nicht anwendbar.	14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender	Nicht geregelt	14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens und gemäß IBC-Code	Nicht geregelt
14.4 Verpackungsgruppe ADR, IMDG, IATA	Nicht geregelt									
14.5 Umweltgefahren:	Nicht anwendbar.									
14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender	Nicht geregelt									
14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens und gemäß IBC-Code	Nicht geregelt									
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 2px 5px;">ABSCHNITT 15: Rechtsvorschriften</div> <p>15.1 Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch</p> <p>Informationen Mögliche Gefahren siehe Kapitel 2.</p> <p>Richtlinie 2012/18/EU</p> <p>Namentlich aufgeführte gefährliche Stoffe - ANHANG I Keiner der Inhaltsstoffe ist enthalten.</p> <p>Nationale Vorschriften:</p> <p>Wassergefährdungsklasse: WGK 1 (VwVwS Anhang 4 vom 19.05.1999): schwach wassergefährdend.</p> <p>15.2 Stoffsicherheitsbeurteilung: Eine Stoffsicherheitsbeurteilung wurde nicht durchgeführt.</p>										
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 2px 5px;">ABSCHNITT 16: Sonstige Angaben</div> <p>Die Angaben stützen sich auf den heutigen Stand unserer Kenntnisse, sie stellen jedoch keine Zusicherung von Produkteigenschaften dar und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis.</p> <p>Relevante Sätze</p> <p>H304 Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.</p> <p>Datenblatt ausstellender Bereich:</p> <p>GCP Produits de Construction SAS ZA des Foulletons, 39140 Larnaud</p> <p>Tel : +(33) 3 84 48 48 60 Fax : +(33) 3 84 48 48 61</p>										

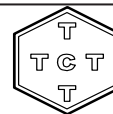
Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Material Safety Data Sheet

ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



according to EC/1272/2008 (Amendment to REACH)

Version: 15/01 E-DM-MF date of last change: September 21, 2017 print date: September 21, 2017 page 1 / 6

1. Identification of the substance / preparation and the Company

Trade name:	ConFormWax®
Industrial sector:	Chemical industry, basic material
Use of the substance/preparation:	Product is defined as raw material for production or for further processing. Please call us at the below stated telephone number to clarify further uses. We will connect you with an application-engineering staff member to help you.
Recommended restrictions on use:	Please see Chapter 16
Company:	Wachs- u. Ceresin-Fabriken TH.C.TROMM GmbH
Street:	Feuerstrasse 7 – 17
City:	D-50735 Köln
Information about substance / preparation:	Wachs- u. Ceresin-Fabriken TH.C.TROMM GmbH
Phone:	+49(0)221 97 4552 0
Fax:	+49(0)221 97 4552 30
E-Mail:	waxlab@wax-tromm.de
Emergency telephone:	+49(0)221 97 4552 0 (Mo-Fr 8:00 to 15:30 h) CET

2. Hazards Identification

2.1 Classification/ Hazards characteristics:	This product does not require labeling. 1272/2008, actual version 67/548EWG or 1999/45/EC, actual versions
2.2 Additional safety information for humans and the environment:	Risk of skin burns caused by hot melt.

3. Composition / Information on Ingredients

Substance/composition related information

Chemical characterization:	wax compound
Component CAS-numbers:	8015-86-9 24937-78-8 64742-51-4 68132-00-3

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Material Safety Data Sheet

ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



according to EC/1272/2008 (Amendment to REACH)

Version: 15/01 E-DM-MF date of last change: September 21, 2017 print date: September 21, 2017 page 2 / 6

Component EINECS-numbers:	232-399-4 200-815-3 203-545-4 265-154-5 complies
Hazard ingredients:	none
REACH-No.:	exempt Monomers registered Monomers registered 01-2119480133-46 Monomers registered

4. First aid measures

General information:	Take away contaminated clothes.
In case of eye contact:	In case of contact with eyes, rinse immediately thoroughly with plenty of water. In case of eye irritation consult an ophthalmologist.
In case of skin contact:	In case of contact with molten product, cool skin area rapidly with cold water. Do not peel solidified product off the skin.
In case of inhalation:	Move affected person into fresh air, keep warm and allow to rest. In case of respiratory tract irritation, consult a physician.
In case of ingestion:	Rinse mouth thoroughly with water.
Information to physician:	No data available. Treat symptomatically

5. Firefighting measures

Suitable extinguishing media:	sand, foam ,dry powder, carbon dioxide (CO ₂)
Extinguishing media which must not to be used for safety reasons:	water
Special exposure hazards arising from the substance or preparation itself, combustion products, resulting gases:	In case of fire may be liberated: Carbon mon- and dioxide, Nitro oxides (NO _x), soot and other organic products.
Special protective equipment for fire fighters:	In case of fire: Wear self-contained breathing apparatus.
Additional information:	Use water spray to protect personnel and to cool endangered containers.

6. Accidental Release measures

Personal precautions:	Wear breathing apparatus if exposed to vapor/dusts/aerosols.
Environmental precautions:	Do not allow into drains, water courses or soil.

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Material Safety Data Sheet

ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



according to EC/1272/2008 (Amendment to REACH)

Version: 15/01 E-DM-MF date of last change: September 21, 2017 print date: September 21, 2017 page 3 / 6

Cleaning procedures:

Allow product to cool down and solidify. Collect in suitable containers for recycling or disposal. Please look disposal considerations.

7. Handling and Storage

Safe handling advice:

Avoid forming of wax vapor/fume. If this is not possible provide proper air ventilation; if necessary use suction plant.

Advice on protection against fire and explosion:

Steps against electrostatic charges should be provided. Product may only form ignitable compositions or burn, if heated up to temperatures higher than flashpoint.

Additionally information:

Requirements for storage areas and containers:

Only use containers approved for the substance/product-group. Keep storage place cool and dry.

Hints for storage:

Materials to avoid:

Strong oxidizing agents.

Further information on storage conditions:

Keep in cool, well ventilated place.

Fire class:

B

Storage class VCI:

11 (burnable solids)

Typical applications:

Observe technical data sheet.

PNEC-Values

No data available

DNEL-Values

No data available

8. Exposure controls / Personal protection

Components with workplace control parameters

National occupational exposure limit value:

No data available

European occupational exposure limit value:

No data available

Engineering measures:

In case of thermal processing, provide for extraction of vapors or adequate ventilation.

Personal protective equipment

Respiratory protection:

Respiratory protection is necessary at aerosol or mist formation: use mask of filter types A2, A2/P2 or ABEK.

Hand protection:

Hand protection in accordance to other used chemicals. Preventive hand protection is recommended.
The regular use of protective skin cream is recommended.

Eye protection:

Protection glasses with side protection.

Body protection:

If contact with hot product is possible, please wear heat resistant and flame retardant protective clothing.

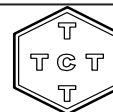
Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Material Safety Data Sheet

ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



according to EC/1272/2008 (Amendment to REACH)

Version: 15/01 E-DM-MF date of last change: September 21, 2017 print date: September 21, 2017 page 4 / 6

Hygiene measures:

Usual precautions for proper handling of chemicals should be observed. After work, before meal breaks, clean wax soiled skin by water and emollient cleaning agent/soap. Avoid inhalation of wax fume.

9. Physical and Chemical Properties

Form:	solid
Color:	off-white to brown
Odor:	low typical
<i>Important health, safety and environmental information</i>	
pH-value:	not applicable
Drop point (DIN ISO 2176):	60 – 100 °C
Boiling temperature / boiling range:	undetermined
Vapor pressure:	undetermined
Density at 20°C (DIN 53217):	approx. 0,95 g/cm ³
Solubility in Water at 20°C:	insoluble
Viscosity at 120°C (DIN 53019):	< 150 mPas
Flash point (DIN ISO 2592):	> 120 °C
Ignition temperature:	not available
Self-ignition:	not determined / only above flash point
Explosion hazard:	only as aerosol / dust
Oxidizing properties:	unknown
Vapor density:	undetermined
Evaporation rate	undetermined

10. Stability and reactivity

Conditions to avoid:	No hazardous reactions known
Materials to avoid:	Strong oxidizing agents
Hazard decomposition products:	No hazardous decompositions products known

11. Toxicological information

Non- human toxicological data

Acute oral toxicity:	LD50 (rat) > 2000 mg/kg
----------------------	-------------------------

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Material Safety Data Sheet

ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



according to EC/1272/2008 (Amendment to REACH)

Version: 15/01 E-DM-MF date of last change: September 21, 2017 print date: September 21, 2017 page 5 / 6

Acute dermal toxicity:	no data available
Additional information:	Data obtained by analogy e.g. QSAR.

12. Ecological information

Ecotoxicity:	No data available.
Behavior in environmental compartments:	Technically correct releases of minimal concentrations to adapted biological sewage plants will not disturb the biodegradability of activated sludge.
Further information:	Do not allow uncontrolled discharge of product into the environment.

13. Disposal considerations

Product:	With respect to local regulations, e.g. dispose of to suitable waste incineration plant.
<i>Waste designations in accordance with EWC</i>	
Waste key number:	No waste key number as per the "European Waste types"-list can be assigned to this product, since such classification is based on the (as yet undetermined) use to which the product is put by the consumer. The waste key number must be determined as per the "European Waste Types"-list (decision on EU Waste Types List 2000/532/EC) in cooperation with the disposal company / producing company / official authority.
Empty packages:	Non-contaminated packages may be recycled. Packing that cannot be properly cleaned must be disposed of.

14. TRANSPORT INFORMATION

ADR/RID:	non-restricted
GGVS/GGVE:	--
IATA-TI:	--
IATA-DGR:	--
IMDG:	--
GGVSee:	--

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Material Safety Data Sheet

ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



according to EC/1272/2008 (Amendment to REACH)

Version: 15/01 E-DM-MF date of last change: September 21, 2017 print date: September 21, 2017 page 6 / 6

15. REGULATORY INFORMATION

Labeling in accordance to EC-directive:

The product does not require a hazard warning label in accordance to 67/548/EWG and 1999/45/EC; as well as EC/1272/2008.

National regulation:

Please check local regulation and contact administration.

Water hazard class

Classification:

not water endangering; in accord. to VwVwS

16. Other information

Recommended restrictions on use:

Do not heat up to temperatures higher than flash point.

SVHC

The substances listed in
(<http://echa.europa.eu/en/candidate-list-table>)
are neither expected nor intentionally introduced during the manufacturing process.
Our products do not have any contact to these substances during the manufacturing process.
The fact that these substances are not intentionally introduced does not exclude that trace levels below 0,1 % may be unintentionally present or may be the result of specific characteristics of the raw material.

The information provided in this Safety Data Sheet is correct to the best of our knowledge, information and belief at the date of its publication. The information given is designed only as guidance for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be considered a warranty or quality specification. The information relates only to the specific material designated and may not be valid for such material used in combination with any other materials or in any process, unless specified in the text.

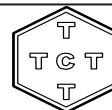
With this latest version of the safety data sheet, all previous versions automatically lose their validity.

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Sicherheitsdatenblatt ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



gem. EG/1272/2008 (Änderung der RECh-VO)

Version: 15/01 D-DM-MF Änderungsdatum: 21. September 2017 Druckdatum: 21. September 2017 Seite 1 / 6

1. Bezeichnung des Stoffes bzw. der Zubereitung und Firmenbezeichnung

Handelsname:	ConFormWax®
Industriezweig:	Chemisch-technische Industrie, Basiskomponente
Verwendung des Stoffes/der Zubereitung:	Das Produkt ist zur weiteren Verarbeitung oder Verwendung als Produktionsrohstoff bestimmt. Zur Abklärung weiterer Anwendungsmöglichkeiten rufen Sie uns bitte unter der angegebenen Telefon-Nummer an. Wir werden Sie an den zuständigen Mitarbeiter der Anwendungstechnik weiterleiten.
Verwendungen von denen abgeraten wird:	s. Kapitel 16 für eine allgemeine Übersicht
Lieferant/Firmenbezeichnung:	Wachs- u. Ceresin-Fabriken TH.C.TROMM GmbH
Straße:	Feuerstrasse 7 – 17
Postleitzahl:	D-50735 Köln
Auskunft zum Stoff/Zubereitung:	Wachs- u. Ceresin-Fabriken TH.C.TROMM GmbH
Telefon:	+49(0)221 97 4552 0
Telefax:	+49(0)221 97 4552 30
E-Mail:	waxlab@wax-tromm.de
Notrufnummer:	+49(0)221 97 4552 0 (Mo-Fr 8:00 bis 15:30 Uhr) MEZ

2. Mögliche Gefahren

2.1 Einstufung/ Gefahrenbezeichnung:	Nicht Kennzeichnungspflichtig 1272/2008, aktuelle Fassung 67/548/EWG oder 1999/45/EG, aktuelle Fassungen
2.2 Zusätzliche Sicherheitshinweise für Mensch und Umwelt:	Gefahr von Hautverbrennungen durch heiße Schmelze

3. Zusammensetzung / Angabe der Bestandteile

Angaben zur Zubereitung / zum Stoff

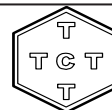
Chemische Charakterisierung:	Wachscompound
CAS-Nummern der Komponenten:	8015-86-9 24937-78-8 64742-51-4 68132-00-3

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Sicherheitsdatenblatt ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



gem. EG/1272/2008 (Änderung der RECh-VO)

Version: 15/01 D-DM-MF Änderungsdatum: 21. September 2017 Druckdatum: 21. September 2017 Seite 2 / 6

EINECS-Nummern der Komponenten:	232-399-4 200-815-3 203-545-4 265-154-5 entspricht keine
Gefährliche Inhaltsstoffe:	
RECh-Registrierungsnummer:	ausgenommen Monomere gelistet Monomere gelistet 01-2119480133-46 Monomere gelistet

4. Erste Hilfe Maßnahmen

Allgemeine Hinweise:	Beschmutzte und getränkte Kleidung ausziehen
Bei Augenkontakt:	Bei Berührung mit den Augen gründlich mit viel Wasser ausspülen. Bei Augenreizung einen Augenarzt aufsuchen.
Bei Hautkontakt:	Nach Kontakt mit dem geschmolzenen Produkt betroffene Hautpartie rasch mit Wasser kühlen. Erstarrtes Produkt nicht von der Haut abziehen.
Nach Einatmen:	Betroffenen an die frische Luft bringen. Bei Reizung der Atemwege Arzt aufsuchen.
Nach Verschlucken:	Mund gründlich mit Wasser ausspülen.
Hinweise für den Arzt:	Keine Angaben verfügbar. Symptomatisch behandeln.

5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung

Geeignete Löschmittel:	Sand, Schaum, Trockenlöschmittel, Kohlendioxid (CO ₂)
Aus Sicherheitsgründen ungeeignete Löschmittel:	Wasservollstrahl
Besondere Gefährdung durch den Stoff oder das Produkt selbst, seine Verbrennungsprodukte oder entstehenden Gase:	Bei Brand können gefährliche Dämpfe/Gase entstehen: Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Stickoxide (NO _x) Ruß und andere organische Produkte.
Besondere Schutzausrüstung bei der Brandbekämpfung:	Im Brandfall: Umluft unabhängiges Atemschutzgerät tragen.
Zusätzliche Hinweise:	Zum Schutz von Personen und zur Kühlung von Behältern im Gefahrenbereich Wassersprühstrahl einsetzen.

6. Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

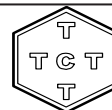
Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen:	Entfernen von Zündquellen, Sicherstellen einer ausreichenden Belüftung/eines ausreichenden Atemschutzes (s. Pkt.8), Vermeiden von Staubeentwicklung.
--------------------------------------	--

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Sicherheitsdatenblatt ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



gem. EG/1272/2008 (Änderung der REACh-VO)

Version: 15/01 D-DM-MF Änderungsdatum: 21. September 2017 Druckdatum: 21. September 2017 Seite 3 / 6

Umweltschutzmaßnahmen:	Nicht in den Untergrund / Erdreich / Kanalisation oder Gewässer gelangen lassen.
Reinigungsverfahren:	Erstarren lassen. Mechanisch aufnehmen. Das aufgenommene Material gemäß Abschnitt Entsorgung behandeln.

7. Handhabung und Lagerung

Hinweise zum sicheren Umgang:	Staubbildung vermeiden. Bei thermischer Verarbeitung für Absaugung der Dämpfe oder ausreichende Lüftung sorgen.
Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz:	Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladung treffen. Produkt kann nur dann zündfähige Gemische bilden oder brennen, wenn es auf Temperaturen oberhalb des Flammpunktes erwärmt wird.
<i>Weitere Hinweise</i>	
Anforderung an Lagerräume und Behälter:	Nur Behälter verwenden, die für den Stoff/ das Produkt/ die Produktgruppe zugelassen sind. Ausreichende Lagerraumbelüftung sicherstellen.
<i>Zusammenlagerungshinweise</i>	
Zu vermeidende Stoffe:	Oxidationsmittel
Weitere Angaben zu Lagerbedingungen:	Behälter an einem kühlen, gut gelüfteten Ort aufbewahren.
Brandklasse:	B
Lagerklasse VCI:	11 (Brennbare Feststoffe)
Bestimmte Verwendungen:	Technisches Datenblatt beachten.
PNEC-Werte	Keine Daten vorhanden
DNEL-Werte	Keine Daten vorhanden

8. Begrenzung und Überwachung der Exposition/persönliche Schutzausrüstung

Bestandteile mit arbeitsplatzbezogenen, zu überwachenden Grenzwerten

Nationale Arbeitsplatzgrenzwerte:	Keine Daten verfügbar
Europäische Arbeitsplatzgrenzwerte:	Keine Daten verfügbar
Technische Schutzmaßnahmen:	Bei thermischer Verarbeitung für Absaugung der Dämpfe und ausreichende Lüftung sorgen.

Persönliche Schutzausrüstung

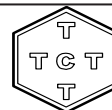
Atemschutz:	Atemschutz bei Aerosol- oder Nebelbildung: Maske mit Filtertyp A2, A2/P2 oder ABEK benutzen.
Handschutz:	Handschutz auf andere verwendete Chemikalien abstimmen. Vorbeugender Handschutz wird empfohlen. Regelmäßiges Verwenden von Hautschutzcreme wird empfohlen.
Augenschutz:	Gestellbrille mit Seitenschutz

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Sicherheitsdatenblatt ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



gem. EG/1272/2008 (Änderung der REACH-VO)

Version: 15/01 D-DM-MF Änderungsdatum: 21. September 2017 Druckdatum: 21. September 2017 Seite 4 / 6

Körperschutz:

Wenn Kontakte mit heißem Produkt möglich, hitzebeständige, schwer entflammbare Schutzausrüstung tragen.

Hygienemaßnahmen:

Die beim Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmaßnahmen sind zu beachten. Nach der Arbeit/vor den Essenspausen ev. Wachsverschmutzte Haut mit Wasser und hautschonenden Reinigungsmitteln reinigen. Einatmen von Wachsdämpfen vermeiden.

9. Physikalische und chemische Eigenschaften

Form: fest

Farbe: weißlich bis braun

Geruch: schwach typisch

Wichtige Angaben zum Gesundheits- und Umweltschutz sowie zur Sicherheit

pH-Wert: nicht anwendbar

Tropfpunkt (DIN ISO 2176): 60 – 100 °C

Siedepunkt/Siedebereich: nicht bestimmt

Dampfdruck: nicht bestimmt

Dichte bei 20°C (DIN 53217): ca. 0,95 g/cm³

Löslichkeit in Wasser: unlöslich

Viskosität bei 120°C (DIN 53019): < 150 mPas

Flammpunkt (DIN ISO 2592): > 120 °C

Zündtemperatur: nicht bestimmt

Selbstentzündlichkeit: nicht bestimmt / erst oberhalb des Flammpunktes

Explosionsgefahr: nur in Aerosol / Staubform

Brandfördernde Eigenschaften: keine bekannt

Dampfdichte: nicht anwendbar

Verdampfungsgeschwindigkeit: nicht anwendbar

10. Stabilität und Reaktivität

Zu vermeidende Bedingungen: Keine gefährlichen Reaktionen bekannt

Zu vermeidende Stoffe: Starke Oxidationsmittel

Gefährliche Zersetzungsprodukte: Keine gefährlichen Zersetzungsprodukte bekannt

11. Toxikologische Angaben

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Sicherheitsdatenblatt ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



gem. EG/1272/2008 (Änderung der REACH-VO)

Version: 15/01 D-DM-MF Änderungsdatum: 21. September 2017 Druckdatum: 21. September 2017 Seite 5 / 6

Nicht humantoxikologische Daten

Akute orale Toxizität:	LD50 (Ratte) > 2000 mg/kg
Akute dermale Toxizität:	keine Angaben verfügbar
Weitere Angaben:	Daten erhalten durch Analogieschluss (QSAR)

12. Umweltbezogene Angaben

Ökotoxizität:	Keine Daten verfügbar
Verhalten in Umweltkompartimenten:	Bei sachgemäßer Einleitung in adaptierte biologische Kläranlagen sind keine Störungen zu erwarten. Produkt kann im Wesentlichen mechanisch abgetrennt werden. Eliminierung erfolgt im überwiegend durch Absorption am Klärschlamm.
Allgemeine Hinweise:	Produkt nicht unkontrolliert in die Umwelt gelangen lassen.

13. Hinweise zur Entsorgung

Produkt:	Kann unter Beachtung der örtlichen behördlichen Vorschriften z.B. einer geeigneten Verbrennungsanlage zugeführt werden.
<i>Abfallschlüsselnummer gemäß Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV)</i>	
Abfallschlüsselnummer:	Für dieses Produkt kann keine Abfallschlüsselnummer gemäß europäischem Abfallverzeichnis festgelegt werden, da erst der Verwendungszweck durch den Verbraucher eine Zuordnung erlaubt. Die Abfallschlüsselnummer ist gemäß europäischem Abfallverzeichnis (2000/532/EG) in Absprache mit dem Entsorger / Hersteller / der Behörde festzulegen.
Restentleerte Verpackung:	Nicht kontaminierte und restentleerte Verpackungen können einer Wiederverwertung zugeführt werden. Nicht reinigungsfähige Verpackungen sind zu entsorgen.

14. Angaben zum Transport

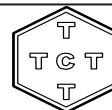
ADR/RID:	Kein Gefahrgut im Sinne der Transportvorschriften
GGVS/GGVE:	--
IATA-TI:	--
IATA-DGR:	--
IMDG:	--
GGVSee:	--

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

Sicherheitsdatenblatt ConFormWax®

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



gem. EG/1272/2008 (Änderung der REACH-VO)

Version: 15/01 D-DM-MF Änderungsdatum: 21. September 2017 Druckdatum: 21. September 2017 Seite 6 / 6

15. Rechtsvorschriften

Kennzeichnung gemäß EG-Richtlinien:

Das Produkt braucht nach der Richtlinie 67/548/EWG bzw. 1999/45/EG; sowie nach der EG/1272/2008 nicht gekennzeichnet werden.

Nationale Vorschriften:

Störfallverordnung:

Anhang I: Gefährliche Inhaltsstoffe nicht namentlich genannt (StörfallV 2000)

TA Luft:

entfällt

Wassergefährdungsklasse

Einstufung:

nicht wassergefährdend gemäß VwVwS

16. Sonstige Angaben

Empfohlene Einschränkungen der Anwendung: Nicht oberhalb des Flammpunktes erhitzen.

SVHC

Die in der Liste

(<http://echa.europa.eu/en/candidate-list-table>)

aufgeführten Substanzen sind in unseren Produkten weder zu erwarten noch wurden Sie während des Produktionsprozesses absichtlich hinzugefügt.

Unsere Produkte haben während des Herstellungsprozesses mit diesen Substanzen keinen Kontakt.



Die Tatsache, dass diese Substanzen nicht absichtlich hinzugefügt werden, schließt nicht aus, dass ubiquitäre Spuren natürlicher Verunreinigungen oder aufgrund charakteristischer Eigenschaften der Rohstoffe mit einem Gehalt von unter 0,1 % unabsichtlich anwesend sind.

Die Angaben in diesem Sicherheitsdatenblatt entsprechen nach bestem Wissen unseren Erkenntnissen bei Drucklegung. Die Informationen sollen Ihnen Anhaltspunkte für den sicheren Umgang mit dem in diesem Sicherheitsdatenblatt genannten Produkt bei Lagerung, Verarbeitung, Transport und Entsorgung geben. Die Angaben sind nicht übertragbar auf andere Produkte. Soweit das in diesem Sicherheitsdatenblatt genannte Produkt mit anderen Materialien vermengt, vermischt oder verarbeitet wird, oder einer Bearbeitung unterzogen wird, können die Angaben in diesem Sicherheitsdatenblatt, soweit sich hieraus nicht ausdrücklich etwas anderes ergibt, nicht auf das so gefertigte neue Material übertragen werden.

Mit dieser neusten Version des Sicherheitsdatenblatts verlieren alle Vorgängerversionen automatisch ihre Gültigkeit.

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

PRODUCT INFORMATION issue 2: 02/2017 p 1/1																																
		ConFormWax®																														
CHARACTERISATION		wax compound																														
PROPERTIES		<table><tr><td>Congealing Point</td><td>(ISO 2207)</td><td>62 – 66</td><td>°C</td></tr><tr><td>Drop Point *)</td><td>(ISO 2176)</td><td>73 – 79</td><td>°C</td></tr><tr><td>Penetration at 25°C</td><td>(DIN 51579)</td><td>3 – 5</td><td>o,1 mm</td></tr><tr><td>Viscosity at 90°C</td><td>(DIN 53019)</td><td>120 - 150</td><td>cps</td></tr><tr><td>Viscosity at 100°C *)</td><td>(DIN 53 019)</td><td>80 – 110</td><td>cps</td></tr><tr><td>Colour *)</td><td>(visual)</td><td colspan="2">off-white / ivory</td></tr><tr><td>Density at 20 °C</td><td></td><td>approx. 0,95</td><td>g/ml</td></tr></table>			Congealing Point	(ISO 2207)	62 – 66	°C	Drop Point *)	(ISO 2176)	73 – 79	°C	Penetration at 25°C	(DIN 51579)	3 – 5	o,1 mm	Viscosity at 90°C	(DIN 53019)	120 - 150	cps	Viscosity at 100°C *)	(DIN 53 019)	80 – 110	cps	Colour *)	(visual)	off-white / ivory		Density at 20 °C		approx. 0,95	g/ml
Congealing Point	(ISO 2207)	62 – 66	°C																													
Drop Point *)	(ISO 2176)	73 – 79	°C																													
Penetration at 25°C	(DIN 51579)	3 – 5	o,1 mm																													
Viscosity at 90°C	(DIN 53019)	120 - 150	cps																													
Viscosity at 100°C *)	(DIN 53 019)	80 – 110	cps																													
Colour *)	(visual)	off-white / ivory																														
Density at 20 °C		approx. 0,95	g/ml																													
		*) part of the delivery specification																														
APPLICATION		<ul style="list-style-type: none">• manufacture of concrete formwork elements by milling elaboration <p>ConFormWax® (Concrete Formwork Wax) is an industrial wax compound, which can be excellently processed by standard CNC-milling-cutter at normal room temperature. Because of its superior form stability, ConFormWax® is well suited for the manufacture of precise free form formwork for normal and ultra-high strength concretes (UHPC) or for molds for cold casts. Milled formwork, molds and chips obtained by CNC-milling can be re-molten and returned to the material cycle by nearly 100 pct. This enables the user to an economic and ecological (free of waste) use of ConFormWax®.</p>																														
FORM SUPPLIED		➤ pellets packed in 25 kg bags																														
FULFILLED PRURITY REQUIREMENTS		The product fulfils the European Directives and national regulations for the mentioned application. Further information are available from our Product Regulatory department on request.																														
STORAGE		The product may be stored in the original packaging at temperature below 30 °C protected against humidity for minimum three years.																														
PRODUCT SAFETY		This product is not considered hazardous according the German hazardous substances regulation (GefStoffV). Additional safety information are included in the safety data sheet (MSDS).																														
REACH STATUS		The raw materials used for the production of the product are compliant with the REACH legislation; they are registered or exempted according to the REACH requirements.																														
TECETE-CHEMIE GmbH Feuerstr.7-17 D-50735 Köln Tel.: +49(0)221974552-0 Fax: +49(0)221974552-30		Hinweise und Empfehlungen für die Verwendung unserer Produkte geben wir nach unseren Kenntnissen. Bitte haben Sie Verständnis, wenn wir eine Verbindlichkeit für das zu erzielende Ergebnis sowie die Beachtung möglicher Rechte Dritter nicht übernehmen können.																														

Anhang A - Produktdatenblätter

ConFormWax

PRODUKTINFORMATION
Stand 2: 01/2017 S 1/1

TECETE-CHEMIE
G.M.B.H. KÖLN



ConFormWax®

BESCHREIBUNG

Wachscompound

EIGENSCHAFTEN

Erstarrungspunkt	(ISO 2207)	62 – 66	°C
Tropfpunkt *)	(ISO 2176)	73 – 79	°C
Penetration bei 25°C	(DIN 51 579)	3 – 5	0,1mm
Viskosität bei 90°C	(DIN 53 019)	120 – 150	mPas
Viskosität bei 100°C *)	(DIN 53 019)	80 – 110	mPas
Dichte bei 20 °C		ca. 0,95	g/ml
Farbe *)	(visuell)	weißlich/elfenbein-hell	

*) Bestandteil der Lieferspezifikation

ANWENDUNG

Herstellung von durch Fräsearbeit geformte Beton-Verschalungselemente

ConFormWax® (Concrete Formwork Wax) ist ein technisches Wachscompound, welches sich bei Raumtemperatur exzellent mit Standard-CNC-Fräsen bearbeiten lässt. Durch seine gute Formstabilität eignet sich ConFormWax® u.a. hervorragend für die Herstellung beliebig frei geformter hoch präziser Schalungskörper für Standard und ultrahochfeste Betone (UHPC) oder Gussformen für den Kaltguss. Durch einschmelzen lassen sich aus ConFormWax® gefräste Schalungen, Gussformen und die bei der CNC Fräsbearbeitung anfallenden Späne in den Materialkreislauf zurückführen, was einen ökonomischen und ökologischen (abfallfreien) Einsatz von ConFormWax® ermöglicht.

LIEFERFORM

➤ Pastillen, verpackt in 25 kg Gebinde

ERFÜLLTE REINHEITS-ANFORDERUNGEN

Das Produkt erfüllt die Anforderungen der europäischen Direktiven und nationalen Regelungen für die genannten Verwendungen. Auf Wunsch erhalten Sie von unserer Abteilung Product Regulatory weitere Informationen.

LAGERUNG

Das Produkt ist im Originalgebinde, geschützt vor Feuchtigkeit, bei Temperaturen bis max. 30°C mindestens drei Jahre lagerfähig.

SICHERHEITSHINWEIS

Das Produkt ist nach der Verordnung über gefährliche Stoffe (GefStoffVO) nicht kennzeichnungspflichtig. Weitere Informationen sind im Sicherheitsdatenblatt zu finden.

REACH STATUS

Die Rohstoffe, die für die Herstellung des Produkts eingesetzt werden, sind entsprechend den REACH-Anforderungen registriert oder ausgenommen.

TECETE-CHEMIE GmbH
Feuerstr.7-17 D-50735 Köln
Tel.: +49(0)221974552-0
Fax: +49(0)221974552-30

Hinweise und Empfehlungen für die Verwendung unserer Produkte geben wir nach unseren Kenntnissen. Bitte haben Sie Verständnis, wenn wir eine Verbindlichkeit für das zu erzielende Ergebnis sowie die Beachtung möglicher Rechte Dritter nicht übernehmen können.

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20D3,5 - S0,5-1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		---	---	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	1477,3447	0,6559	0,1881	0,5466
2	3002,2327	1,3226	0,3823	1,1022
3	4104,0342	1,9893	0,5225	1,6577
4	5265,2544	3,0159	0,6704	2,5133
5	6332,4585	4,3501	0,8063	3,6251
6	7282,9966	5,8334	0,9273	4,8612
7	8285,1484	7,7609	1,0549	6,4674
8	9129,9453	10,0114	1,1625	8,3428
9	9977,1582	10,6794	1,2703	8,8995
10	9940,6504	11,0128	1,2657	9,1773

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10021,1621	10,7794	1,2759	8,9829

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9390

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20D3,5 - S0,5-2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		---	---	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	1881,1429	0,8384	0,2395	0,6987
2	3443,9407	1,6718	0,4385	1,3931
3	4848,0942	2,8768	0,6173	2,3973
4	6137,6401	4,5468	0,7815	3,7890
5	7349,1880	6,5526	0,9357	5,4605
6	8576,1123	9,0918	1,0919	7,5765
7	9724,4150	12,3893	1,2382	10,3244
8	10573,6855	18,8118	1,3463	15,6765
9	8806,4668	22,0946	1,1213	18,4122
10	8563,4541	22,0946	1,0903	18,4122

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10578,4307	19,3951	1,3469	16,1626

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8952

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20D3,5 - S1,0-1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		---	---	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	1324,1245	0,5913	0,1686	0,4927
2	2689,9397	1,1746	0,3425	0,9789
3	3726,2952	1,7580	0,4744	1,4650
4	4584,6216	2,4063	0,5837	2,0053
5	5693,2539	3,5638	0,7249	2,9698
6	6559,9302	4,7446	0,8352	3,9539
7	7420,2158	6,1996	0,9448	5,1664
8	8259,0928	8,0530	1,0516	6,7108
9	8985,7119	11,4313	1,1441	9,5261
10	8292,7588	13,8161	1,0559	11,5134

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8988,0166	11,7230	1,1444	9,7691

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9311

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20D3,5 - S1,0-2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		---	---	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	1172,4501	0,5968	0,1493	0,4973
2	2514,8708	1,1918	0,3202	0,9932
3	3534,1169	1,7868	0,4500	1,4890
4	4476,7466	2,5476	0,5700	2,1230
5	5536,5684	3,7376	0,7049	3,1147
6	6387,0391	4,9460	0,8132	4,1216
7	7262,8862	6,4368	0,9247	5,3640
8	8128,1362	8,2884	1,0349	6,9070
9	8938,3652	11,0802	1,1381	9,2335
10	8002,5024	14,2314	1,0189	11,8595

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
9094,3223	12,6151	1,1579	10,5126

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8940

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20D3,5 - S2,0-1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		---	---	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	1154,2679	0,5865	0,1470	0,4887
2	2332,9097	1,1698	0,2970	0,9748
3	3244,6582	1,7531	0,4131	1,4609
4	4277,6943	2,6798	0,5447	2,2332
5	5219,7690	3,8465	0,6646	3,2054
6	6041,9521	5,1098	0,7693	4,2582
7	6931,5820	6,7640	0,8826	5,6367
8	7750,7173	8,7281	0,9869	7,2734
9	8441,3555	12,3706	1,0748	10,3089
10	7939,7666	14,5549	1,0109	12,1291

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8449,4805	12,8365	1,0758	10,6970

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8330

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20D3,5 - S2,0-2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		---	---	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	1077,9211	0,6541	0,1372	0,5451
2	2232,1763	1,2374	0,2842	1,0312
3	3148,4109	1,8208	0,4009	1,5173
4	4169,6162	2,7283	0,5309	2,2736
5	5121,8047	3,8950	0,6521	3,2458
6	5938,3945	5,1383	0,7561	4,2819
7	6822,4111	6,7791	0,8687	5,6493
8	7646,1294	8,7449	0,9735	7,2874
9	8418,5781	11,8658	1,0719	9,8882
10	7764,8057	15,5662	0,9886	12,9719

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8494,0977	13,0025	1,0815	10,8354

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8172

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20D3,5 - SX-1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		---	---	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	1285,6752	0,6558	0,1637	0,5465
2	2716,3748	1,2799	0,3459	1,0666
3	3775,8748	1,9041	0,4808	1,5868
4	4828,6782	2,7966	0,6148	2,3305
5	5890,7114	4,0450	0,7500	3,3708
6	6771,9199	5,3458	0,8622	4,4548
7	7708,4048	7,0175	0,9815	5,8479
8	8605,1797	9,0775	1,0956	7,5646
9	9442,9463	12,1866	1,2023	10,1555
10	8845,6719	16,7614	1,1263	13,9678

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
9613,7246	14,3133	1,2241	11,9277

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9112

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20D3,5 - SX-2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		---	---	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	1184,4637	0,6342	0,1508	0,5285
2	2490,0264	1,2526	0,3170	1,0438
3	3445,6895	1,8709	0,4387	1,5591
4	4558,8613	2,9018	0,5805	2,4181
5	5540,6133	4,1509	0,7055	3,4591
6	6409,2383	5,5084	0,8160	4,5904
7	7353,2788	7,2751	0,9362	6,0626
8	8228,4131	9,3193	1,0477	7,7660
9	9071,0596	12,2992	1,1550	10,2494
10	8547,2949	16,6775	1,0883	13,8980

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
9306,3457	14,7709	1,1849	12,3091

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8516

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Fotos der Versuchskörper



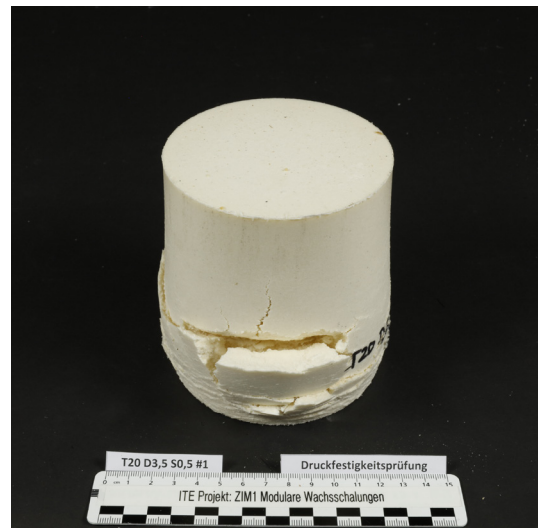
T20 D3,5 S0,5 #1



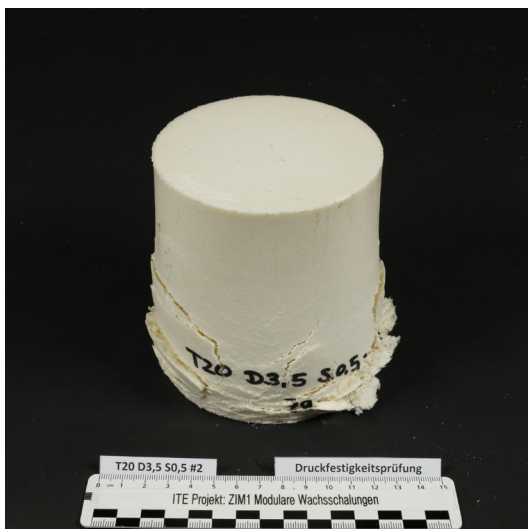
T20 D3,5 S0,5 #1



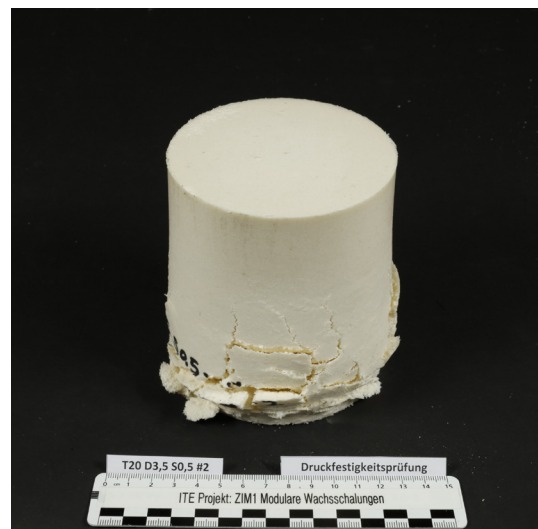
T20 D3,5 S0,5 #1



T20 D3,5 S0,5 #1



T20 D3,5 S0,5 #2



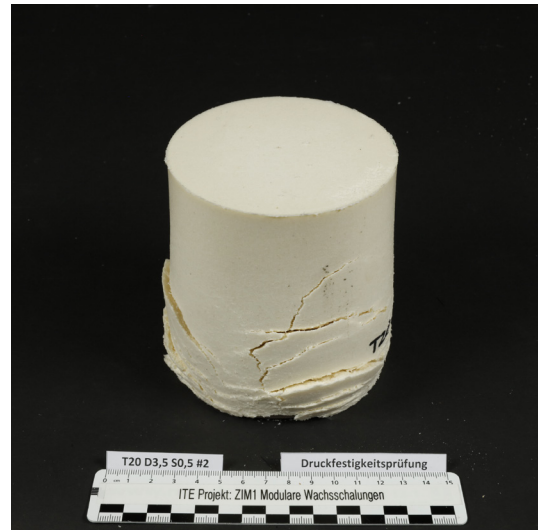
T20 D3,5 S0,5 #2

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Fotos der Versuchskörper



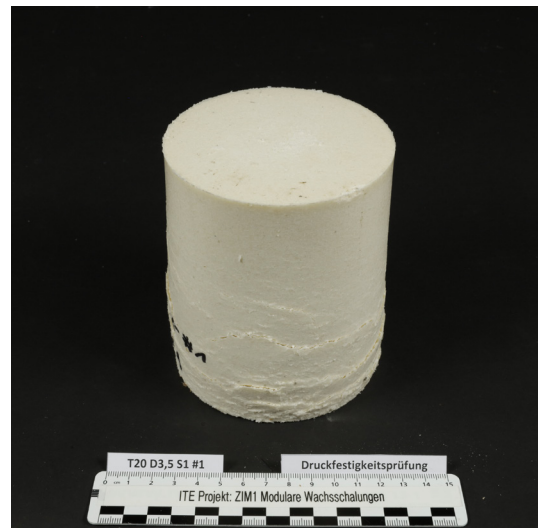
T20 D3,5 S0,5 #2



T20 D3,5 S0,5 #2



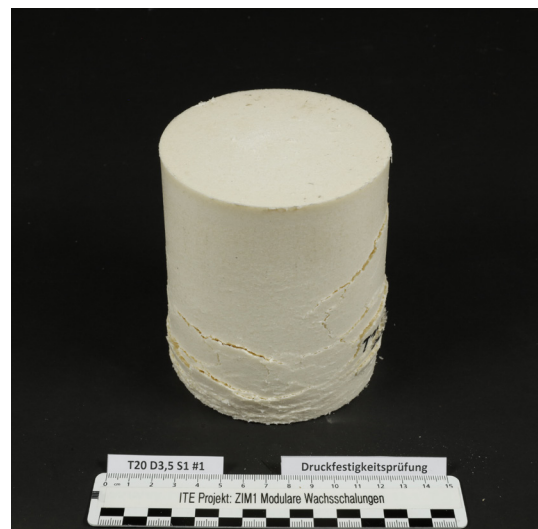
T20 D3,5 S1 #1



T20 D3,5 S1 #1



T20 D3,5 S1 #1



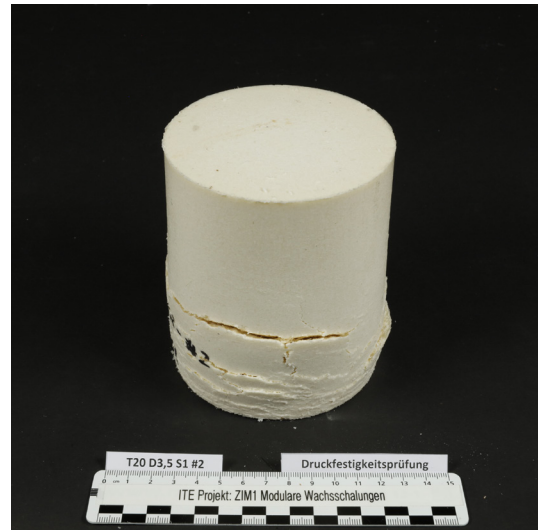
T20 D3,5 S1 #1

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Fotos der Versuchskörper



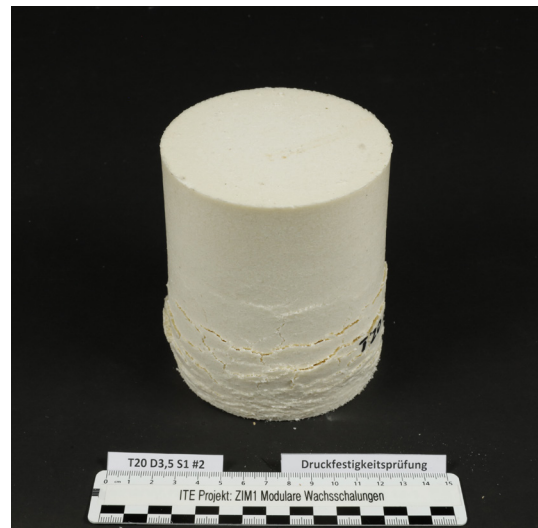
T20 D3,5 S1 #2



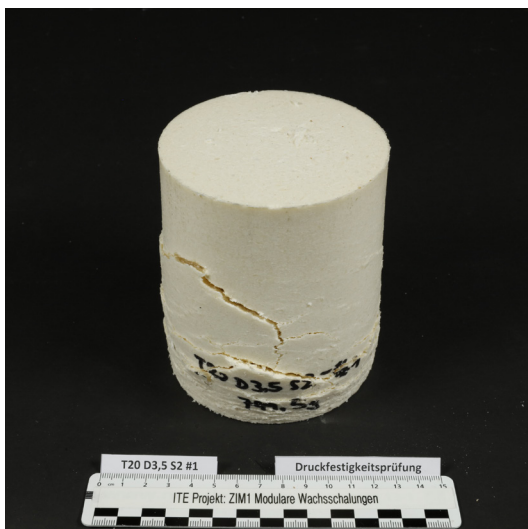
T20 D3,5 S1 #2



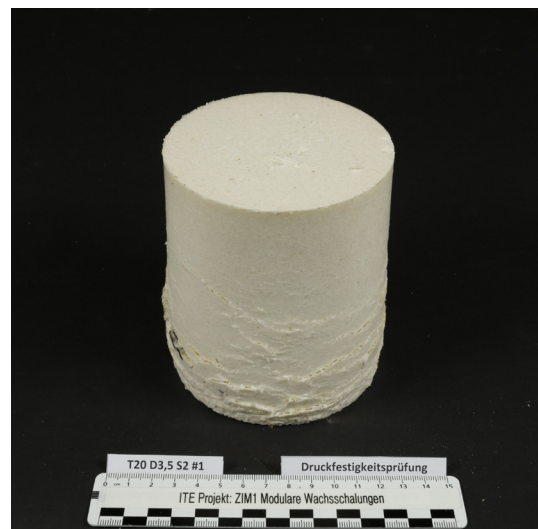
T20 D3,5 S1 #2



T20 D3,5 S1 #2



T20 D3,5 S2 #1



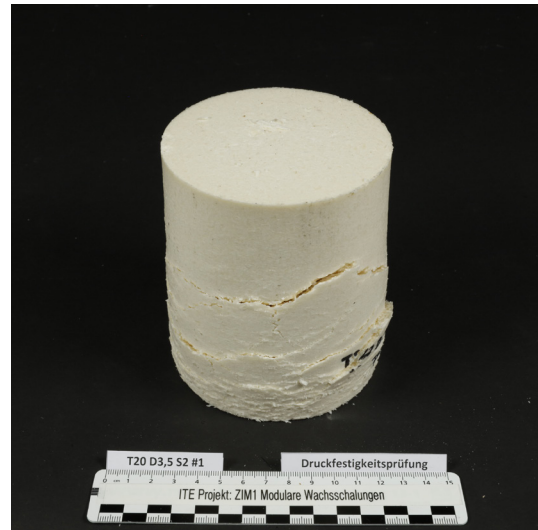
T20 D3,5 S2 #1

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

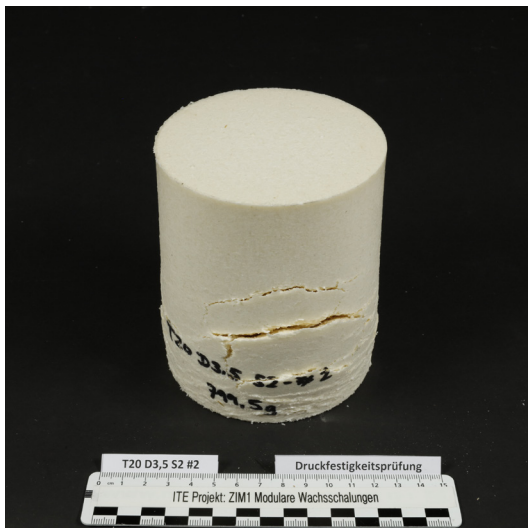
Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Fotos der Versuchskörper



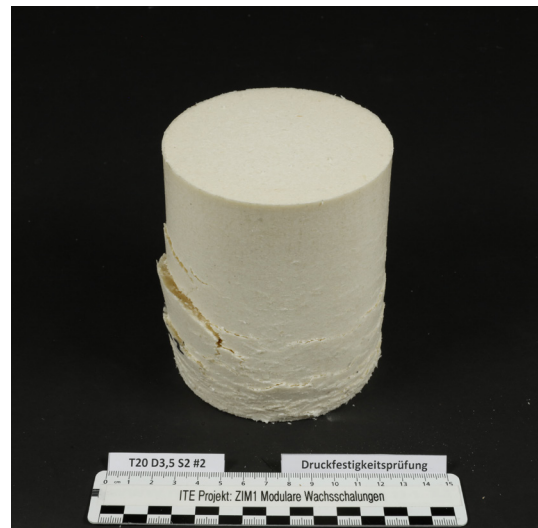
T20 D3,5 S2 #1



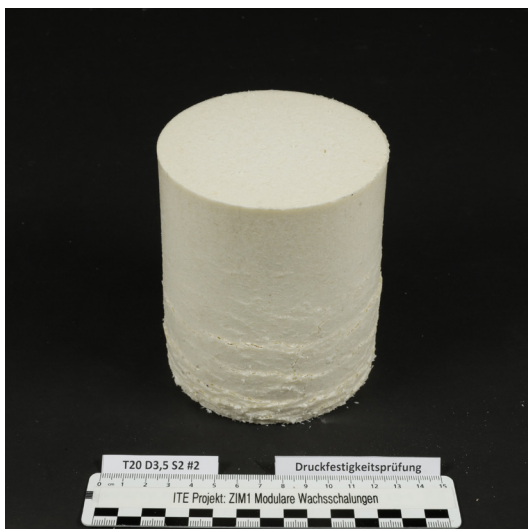
T20 D3,5 S2 #1



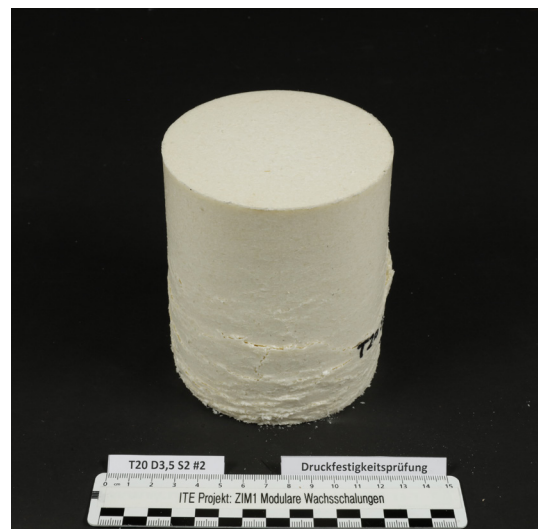
T20 D3,5 S2 #2



T20 D3,5 S2 #2



T20 D3,5 S2 #2



T20 D3,5 S2 #2

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Fotos der Versuchskörper



T20 D3,5 SX #1



T20 D3,5 SX #1



T20 D3,5 SX #1



T20 D3,5 SX #1



T20 D3,5 SX #2



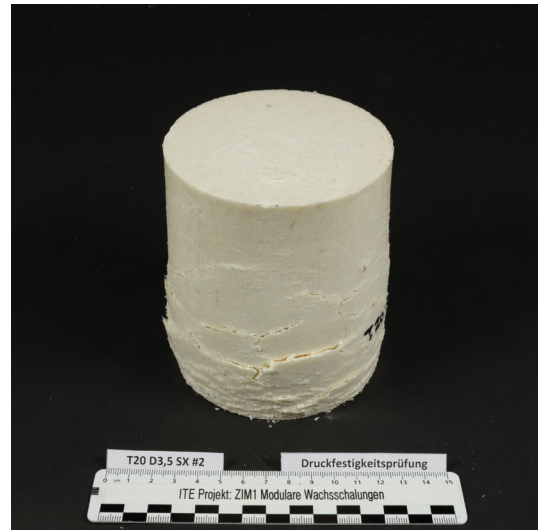
T20 D3,5 SX #2

Anhang B - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.1.4

Einfluss der Größe der Wachsspäne auf die Druckfestigkeit gepresster Wachsprüfkörper
Fotos der Versuchskörper



T20 D3,5 SX #2



T20 D3,5 SX #2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T10 D1 #1	Höhe [mm] 183	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 819	Rohdichte [g/cm ³] 0,5698	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,5071	0,0000	0,0063	0,0000
1	89,7054	0,3007	0,0114	0,1643
2	215,7798	1,4088	0,0275	0,7699
3	411,1399	2,9469	0,0523	1,6103
4	580,2293	4,5418	0,0739	2,4819
5	731,4819	6,1376	0,0931	3,3539
6	859,9633	7,7334	0,1095	4,2259
7	950,7839	9,3291	0,1211	5,0979
8	998,4427	10,9249	0,1271	5,9699
9	998,6924	12,5207	0,1272	6,8419
10	874,0668	13,4239	0,1113	7,3355

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
1006,0471	11,6998	0,1281	6,3933

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,1079

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T10 D1 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		185	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		819	0,5637	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg ΔL [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,6179	0,0000	0,0063	0,0000
1	89,8814	0,3394	0,0114	0,1834
2	243,1739	1,8250	0,0310	0,9865
3	414,9998	3,6142	0,0528	1,9536
4	570,2890	5,4035	0,0726	2,9208
5	716,0677	7,1928	0,0912	3,8880
6	848,1178	8,9821	0,1080	4,8552
7	951,8224	10,7714	0,1212	5,8224
8	1008,1022	12,5607	0,1284	6,7896
9	999,4179	14,3500	0,1272	7,7567
10	841,6181	15,2214	0,1072	8,2278

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg ΔL bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
1012,1546	13,1559	0,1289	7,1113

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,0947

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T10 D2 #1	Höhe [mm] 160	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 815	Rohdichte [g/cm ³] 0,6486	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,5468	0,0000	0,0063	0,0000
1	107,4613	0,3689	0,0137	0,2306
2	344,7919	1,3895	0,0439	0,8684
3	607,6249	2,3221	0,0774	1,4513
4	862,2142	3,4742	0,1098	2,1713
5	1111,9502	4,9751	0,1416	3,1094
6	1335,9753	6,8545	0,1701	4,2841
7	1472,6954	8,7948	0,1875	5,4967
8	1526,6012	10,7350	0,1944	6,7094
9	1512,2181	12,6753	0,1925	7,9221
10	1381,2751	13,9761	0,1759	8,7351

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
1528,5725	11,1906	0,1946	6,9941

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,1774

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

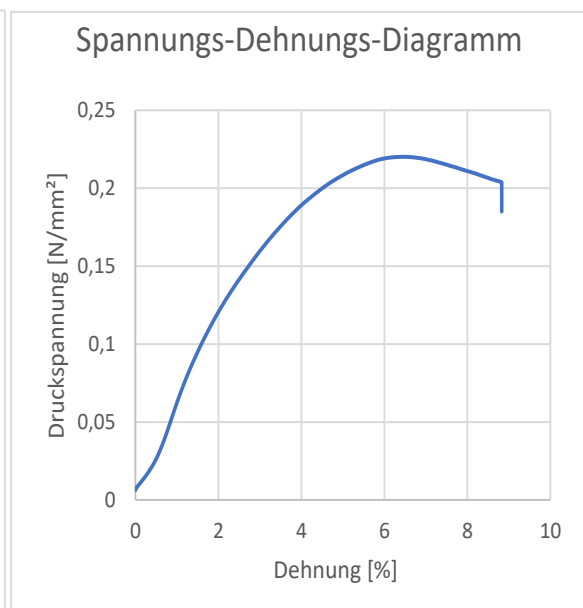
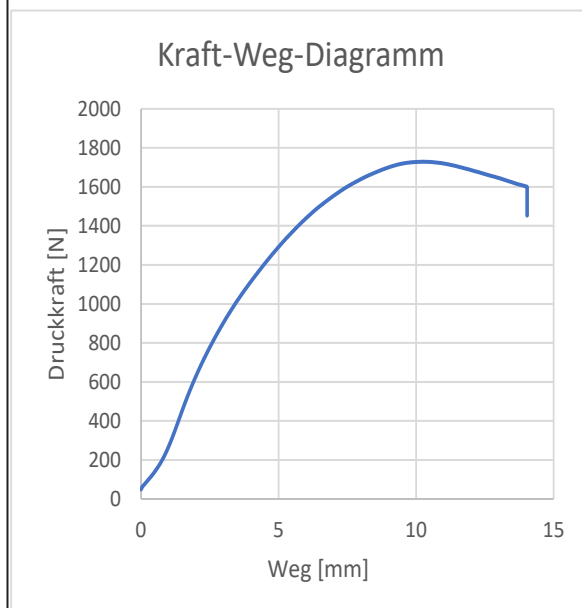
Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T10 D2 #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm²]
		159	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm³]	
		815	0,6526	
	Ergebnisse:			
Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,5213	0,0000	0,0063	0,0000
1	121,4154	0,3998	0,0155	0,2514
2	402,6609	1,3660	0,0513	0,8591
3	695,2379	2,2091	0,0885	1,3894
4	975,3801	3,3084	0,1242	2,0807
5	1246,5679	4,7261	0,1587	2,9724
6	1508,8932	6,5710	0,1921	4,1327
7	1682,9672	8,6689	0,2143	5,4522
8	1724,5457	10,7669	0,2196	6,7716
9	1651,5234	12,8648	0,2103	8,0911
10	1452,9064	14,0362	0,1850	8,8278

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
1729,1735	10,2794	0,2202	6,4650

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,2090



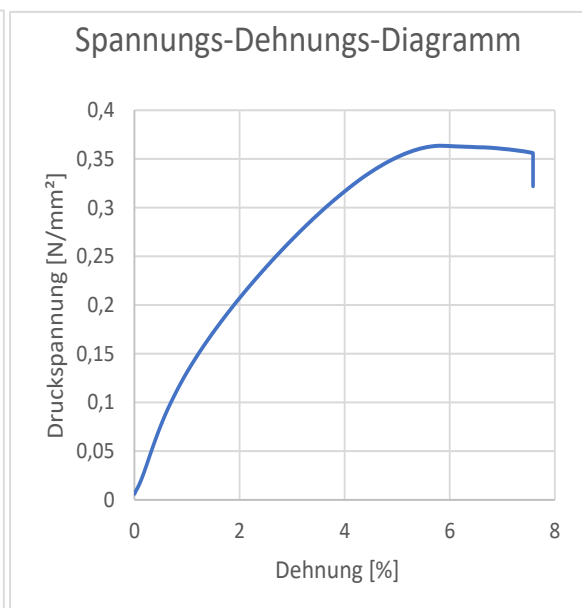
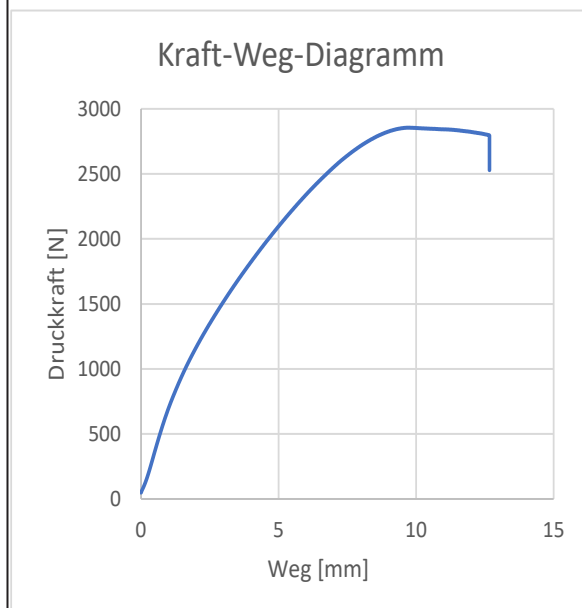
Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T10 D3 #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm²]
		167	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm³]	
		910	0,6938	
	Ergebnisse:			
Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,4593	0,0000	0,0063	0,0000
1	363,3855	0,4973	0,0463	0,2978
2	734,0510	1,0637	0,0935	0,6370
3	1106,1875	1,8539	0,1408	1,1101
4	1470,1020	2,8529	0,1872	1,7083
5	1815,4139	3,9700	0,2311	2,3772
6	2164,8464	5,2669	0,2756	3,1538
7	2506,0783	6,7736	0,3191	4,0561
8	2819,3481	8,9128	0,3590	5,3370
9	2835,4745	11,5020	0,3610	6,8874
10	2528,5072	12,6679	0,3219	7,5856

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
2855,4695	9,7662	0,3636	5,8481

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,3454



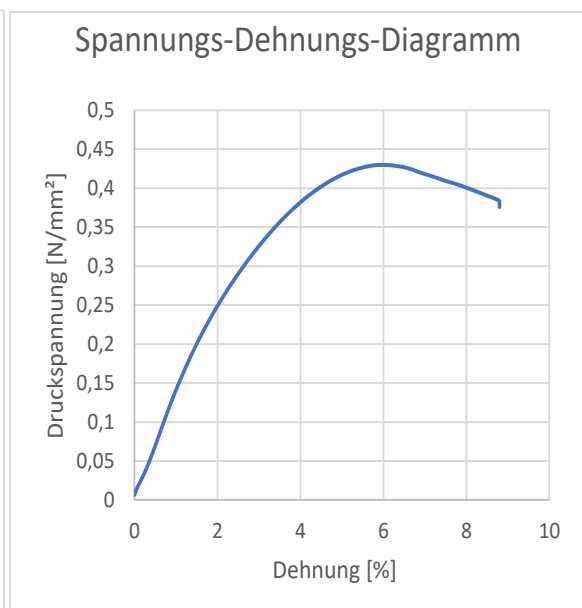
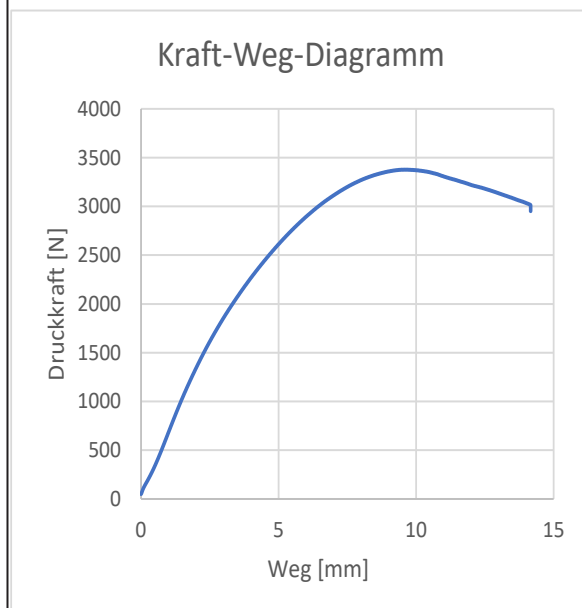
Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T10 D3 #3	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		161	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		885	0,6999	
	Ergebnisse:			
Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	52,1854	0,0000	0,0066	0,0000
1	410,2782	0,6127	0,0522	0,3806
2	850,0657	1,2311	0,1082	0,7647
3	1270,1692	1,8782	0,1617	1,1666
4	1755,4490	2,7835	0,2235	1,7289
5	2178,7814	3,7640	0,2774	2,3379
6	2610,2113	4,9930	0,3323	3,1012
7	3022,4368	6,5485	0,3848	4,0674
8	3365,5754	9,1434	0,4285	5,6791
9	3203,0070	12,2215	0,4078	7,5910
10	2790,5542	10,6232	0,3553	6,5983

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
3376,7446	9,5779	0,4299	5,9490

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4097



Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T10 D4 #1	Höhe [mm] 165	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 950	Rohdichte [g/cm ³] 0,7331	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	52,1854	0,0000	0,0066	0,0000
1	410,2782	0,6127	0,0522	0,3713
2	850,0657	1,2311	0,1082	0,7461
3	1270,1692	1,8782	0,1617	1,1383
4	1755,4490	2,7835	0,2235	1,6870
5	2178,7814	3,7640	0,2774	2,2812
6	2610,2113	4,9930	0,3323	3,0261
7	3022,4368	6,5485	0,3848	3,9688
8	3365,5754	9,1434	0,4285	5,5415
9	3203,0070	12,2215	0,4078	7,4070
10	2790,5542	10,6232	0,3553	6,4383

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
3376,7446	9,5779	0,4299	5,8048

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4097

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T10 D4 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		158	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		920	0,7414	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,8773	0,0000	0,0057	0,0000
1	403,9192	0,6312	0,0514	0,3995
2	989,1544	1,2847	0,1259	0,8131
3	1675,0771	1,9382	0,2133	1,2267
4	2199,8203	2,5917	0,2801	1,6403
5	2658,3064	3,3148	0,3385	2,0980
6	3163,1525	4,2875	0,4027	2,7136
7	3611,5164	5,3464	0,4598	3,3838
8	4059,3783	6,7249	0,5169	4,2562
9	4449,2723	9,1102	0,5665	5,7659
10	4136,0383	8,6338	0,5266	5,4644

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4467,6006	10,1026	0,5688	6,3941

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,5443

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T10 D5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		155	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		945	0,7763	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	42,3158	0,0000	0,0054	0,0000
1	757,2994	0,5183	0,0964	0,3344
2	1484,7752	0,9655	0,1890	0,6229
3	2118,3263	1,4127	0,2697	0,9114
4	2944,4904	2,1642	0,3749	1,3963
5	3677,5597	3,0586	0,4682	1,9733
6	4297,8877	4,0063	0,5472	2,5847
7	4977,2620	5,2867	0,6337	3,4107
8	5597,2732	6,8605	0,7127	4,4261
9	5972,4543	10,2028	0,7604	6,5824
10	5174,6947	10,1375	0,6589	6,5403

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5998,2339	9,3756	0,7637	6,0488

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7431

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T10 D5 #2	Höhe [mm] 156	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 945	Rohdichte [g/cm ³] 0,7713	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	43,6325	0,0000	0,0056	0,0000
1	723,4840	0,4513	0,0921	0,2893
2	1427,6830	0,8598	0,1818	0,5511
3	2006,3097	1,2687	0,2555	0,8132
4	2782,1077	1,9967	0,3542	1,2799
5	3447,3200	2,8136	0,4389	1,8036
6	4007,8674	3,6508	0,5103	2,3402
7	4634,3063	4,7888	0,5901	3,0697
8	5207,3778	6,1435	0,6630	3,9381
9	5720,3135	8,6078	0,7283	5,5178
10	4978,6432	8,1890	0,6339	5,2493

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5725,5103	8,8511	0,7290	5,6738

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7180

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T20 D1 #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		174	100	7853,98
	Ergebnisse:	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		819	0,5993	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,5162	0,0000	0,0063	0,0000
1	159,1319	0,3754	0,0203	0,2157
2	413,9640	1,3055	0,0527	0,7503
3	672,4738	2,5413	0,0856	1,4605
4	926,4913	4,0345	0,1180	2,3187
5	1175,8469	5,8021	0,1497	3,3345
6	1408,4704	7,7352	0,1793	4,4455
7	1600,5005	9,7072	0,2038	5,5788
8	1727,5492	11,6800	0,2200	6,7126
9	1767,2418	13,6528	0,2250	7,8464
10	1630,0681	14,8786	0,2075	8,5509

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
1767,2598	13,6423	0,2250	7,8404

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,1768

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]	1
		171	100	7853,98	
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]		
Ergebnisse:		819	0,6098		

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,4924	0,0000	0,0063	0,0000
1	166,3790	0,3998	0,0212	0,2338
2	457,6772	1,2262	0,0583	0,7171
3	745,2728	2,0712	0,0949	1,2112
4	1026,0668	3,1387	0,1306	1,8355
5	1299,7803	4,5234	0,1655	2,6453
6	1566,7879	6,2357	0,1995	3,6466
7	1810,7979	8,2733	0,2306	4,8382
8	1972,0528	10,3662	0,2511	6,0621
9	2024,9623	12,4600	0,2578	7,2866
10	1866,3896	13,8529	0,2376	8,1011

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4247,2661	9,7501	0,5408	5,7018

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,2209

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D2 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		178	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		951	0,6803	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	51,1355	0,0000	0,0065	0,0000
1	485,3724	0,5960	0,0618	0,3349
2	982,4665	1,2140	0,1251	0,6820
3	1412,0172	1,8601	0,1798	1,0450
4	1878,8639	2,7819	0,2392	1,5629
5	2307,6265	3,8731	0,2938	2,1759
6	2728,7355	5,1540	0,3474	2,8955
7	3144,4294	6,6432	0,4004	3,7321
8	3550,2949	8,4819	0,4520	4,7651
9	3881,3652	11,2537	0,4942	6,3223
10	3611,5969	9,9736	0,4598	5,6031

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
3898,7231	11,8768	0,4964	6,6723

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4279

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T20 D2 #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		147	100	7853,98
	Ergebnisse:	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		815	0,7059	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,9862	0,0000	0,0057	0,0000
1	494,7380	0,6092	0,0630	0,4144
2	984,1934	1,0174	0,1253	0,6921
3	1604,8522	1,6102	0,2043	1,0954
4	2086,4137	2,2415	0,2657	1,5248
5	2557,2077	3,0462	0,3256	2,0722
6	3004,3917	4,0031	0,3825	2,7232
7	3442,4169	5,1548	0,4383	3,5067
8	3865,6972	6,6394	0,4922	4,5166
9	4228,4872	9,1519	0,5384	6,2258
10	3875,3401	8,1442	0,4934	5,5403

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4247,2661	9,7501	0,5408	6,6327

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,5116

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

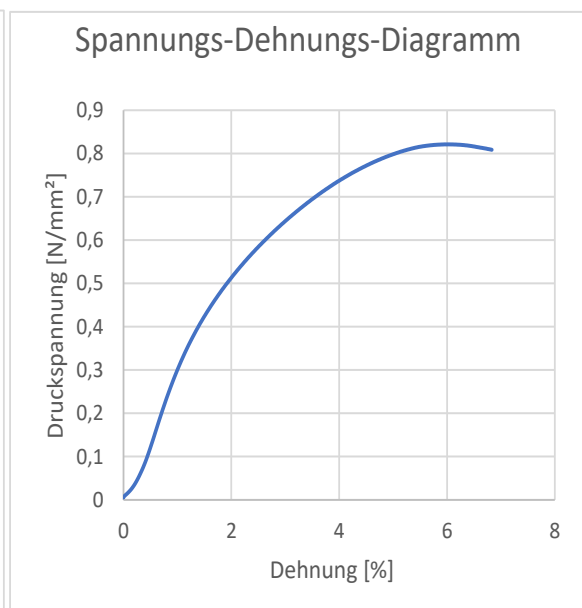
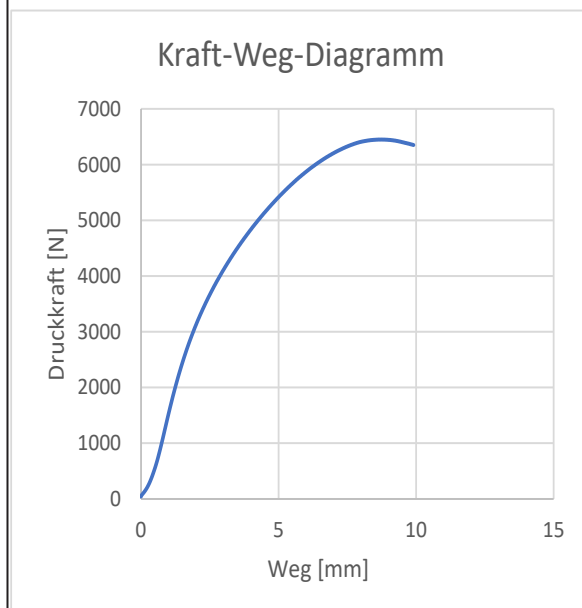
Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T20 D3 #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm²]
		145	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm³]	
		867	0,7613	
	Ergebnisse:			
Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm²]	Dehnung ΔL [%]
0	43,2762	0,0000	0,0055	0,0000
1	685,4652	0,5856	0,0873	0,4039
2	1554,0017	1,0128	0,1979	0,6985
3	2343,3233	1,4400	0,2984	0,9931
4	2962,3650	1,8672	0,3772	1,2877
5	3743,5551	2,5801	0,4766	1,7794
6	4453,2219	3,4345	0,5670	2,3686
7	5052,3677	4,3427	0,6433	2,9950
8	5695,1505	5,5788	0,7251	3,8475
9	6280,5244	7,2967	0,7997	5,0322
10	5912,8963	8,1111	0,7529	5,5939

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
6449,9082	8,7511	0,8212	6,0352

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7990



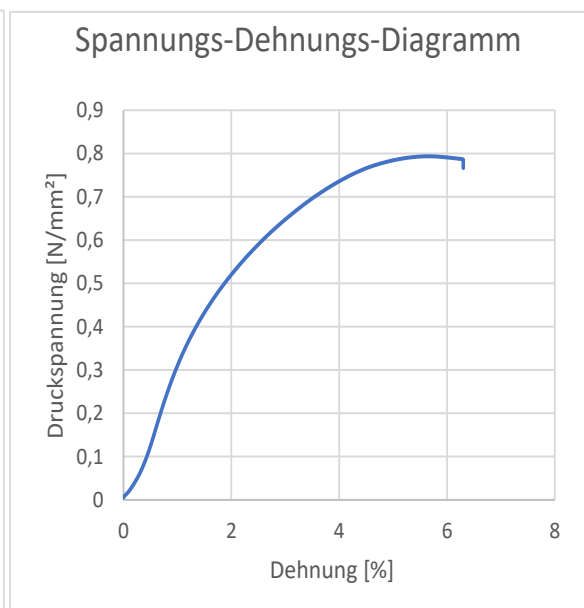
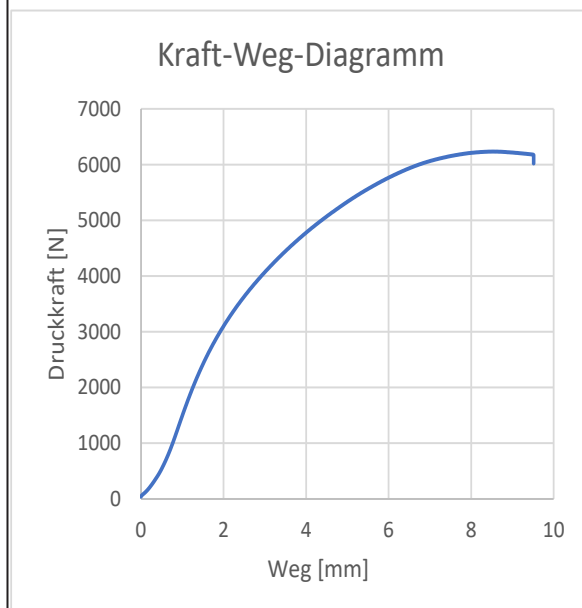
Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T20 D3 #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm²]
		151	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm³]	
		900	0,7589	
	Ergebnisse:			
Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,8441	0,0000	0,0052	0,0000
1	710,0323	0,6084	0,0904	0,4029
2	1532,2465	1,0178	0,1951	0,6741
3	2300,3031	1,4272	0,2929	0,9452
4	2899,3858	1,8366	0,3692	1,2163
5	3658,6400	2,5273	0,4658	1,6737
6	4336,3192	3,3462	0,5521	2,2160
7	4912,2762	4,2216	0,6255	2,7957
8	5527,6481	5,4158	0,7038	3,5866
9	6087,1903	7,1172	0,7750	4,7134
10	5671,6934	7,6126	0,7221	5,0415

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
6234,2144	8,5398	0,7938	5,6555

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7844



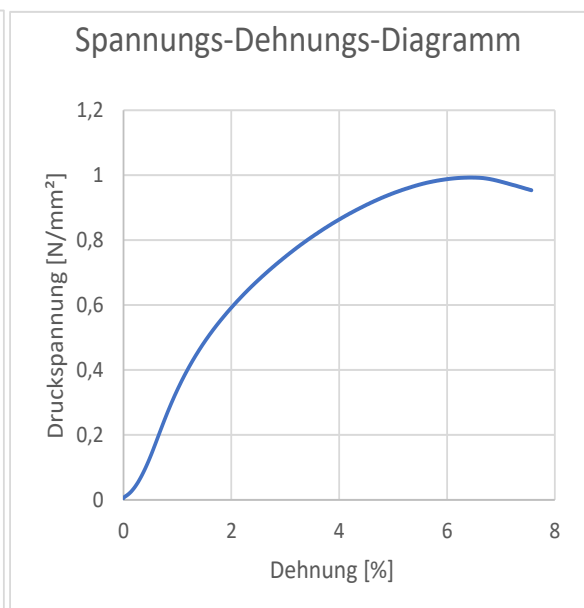
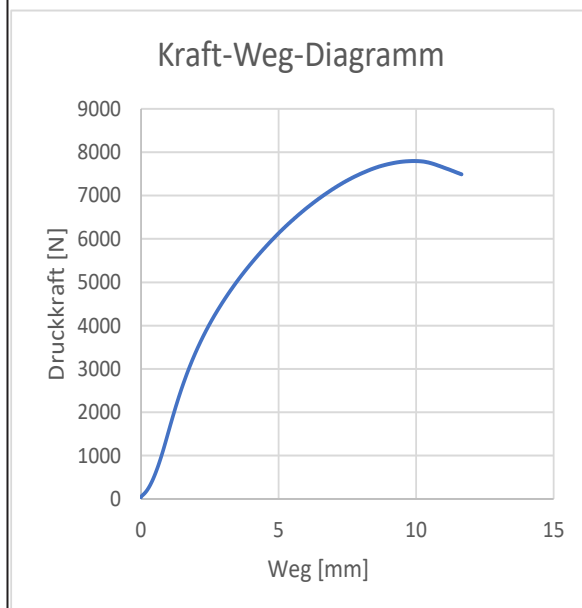
Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T20 D4 #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm²]
		154	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm³]	
		950	0,7854	
	Ergebnisse:			
Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,7047	0,0000	0,0049	0,0000
1	855,2595	0,6716	0,1089	0,4361
2	1968,5732	1,1873	0,2506	0,7709
3	2947,0920	1,7030	0,3752	1,1058
4	3701,4794	2,2195	0,4713	1,4412
5	4658,3320	3,0901	0,5931	2,0065
6	5524,4905	4,1214	0,7034	2,6763
7	6254,9951	5,2030	0,7964	3,3785
8	7018,9125	6,6645	0,8937	4,3276
9	7722,0875	8,9611	0,9832	5,8189
10	6975,7576	8,0166	0,8882	5,2056

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7797,4585	9,8661	0,9928	6,4065

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9404



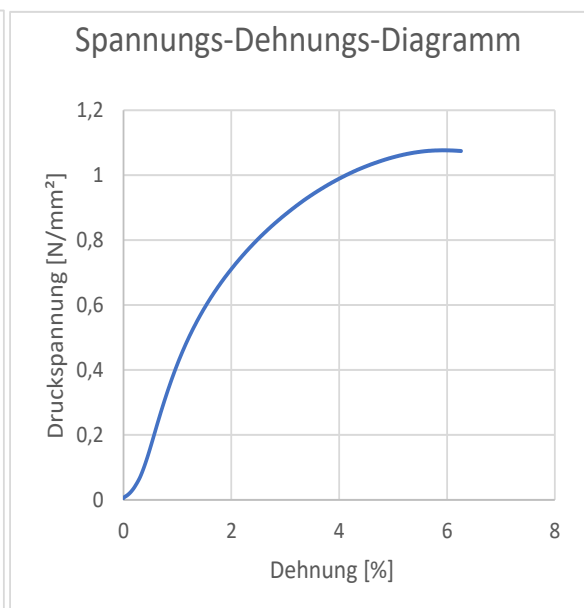
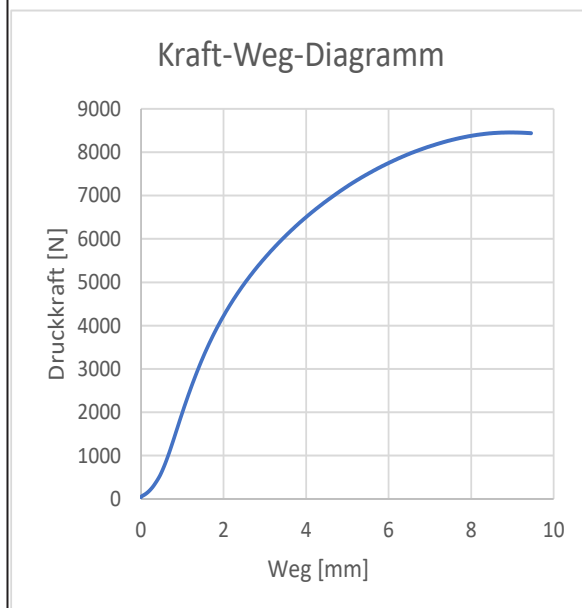
Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T20 D4 #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		151	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		950	0,8010	
	Ergebnisse:			
Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	39,7108	0,0000	0,0051	0,0000
1	876,8897	0,6095	0,1116	0,4036
2	2249,3715	1,0922	0,2864	0,7233
3	3427,2452	1,5750	0,4364	1,0430
4	4320,4867	2,0577	0,5501	1,3627
5	5020,4964	2,5430	0,6392	1,6841
6	5911,7148	3,3381	0,7527	2,2106
7	6737,4193	4,3035	0,8578	2,8500
8	7435,5320	5,3770	0,9467	3,5609
9	8132,4755	6,9902	1,0355	4,6293
10	7906,2737	6,6144	1,0067	4,3804

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8456,2197	8,9558	1,0767	5,9310

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,0553



Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T20 D5 #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		150	100	7853,98
	Ergebnisse:	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		980	0,8318	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,6241	0,0000	0,0048	0,0000
1	1023,7025	0,7026	0,1303	0,4684
2	2700,4178	1,2684	0,3438	0,8456
3	4256,0855	1,8342	0,5419	1,2228
4	5384,3677	2,4001	0,6856	1,6000
5	6241,0373	2,9659	0,7946	1,9772
6	7200,9753	3,7742	0,9169	2,5162
7	8227,7902	4,9059	1,0476	3,2706
8	9053,9512	6,1751	1,1528	4,1168
9	9873,1839	7,8932	1,2571	5,2621
10	9195,4647	7,5967	1,1708	5,0645

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10175,0771	9,5666	1,2955	6,3777

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,2390

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		153	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		980	0,8155	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	39,5793	0,0000	0,0050	0,0000
1	921,0156	0,6012	0,1173	0,3930
2	2241,7377	1,1151	0,2854	0,7288
3	3508,8589	1,6291	0,4468	1,0648
4	4435,5146	2,1430	0,5647	1,4007
5	5171,1069	2,6913	0,6584	1,7590
6	6183,6865	3,6902	0,7873	2,4119
7	6992,3830	4,7205	0,8903	3,0853
8	7735,6486	5,9360	0,9849	3,8797
9	8468,7003	7,6988	1,0783	5,0319
10	8180,6226	7,2934	1,0416	4,7669

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8787,1592	9,6182	1,1188	6,2864

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,0765

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T30 D1 #1	Höhe [mm] 139	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 760	Rohdichte [g/cm ³] 0,6962	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,1814	0,0000	0,0063	0,0000
1	358,6107	0,4280	0,0457	0,3079
2	798,8804	0,8763	0,1017	0,6304
3	1255,9410	1,3246	0,1599	0,9529
4	1658,2700	1,7729	0,2111	1,2754
5	1998,5083	2,2211	0,2545	1,5979
6	2322,0877	2,7587	0,2957	1,9847
7	2638,8572	3,5137	0,3360	2,5279
8	2929,5734	4,9081	0,3730	3,5310
9	2943,9031	7,1478	0,3748	5,1423
10	2640,1888	8,3334	0,3362	5,9952

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
2987,6575	6,0317	0,3804	4,3394

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,3762

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T30 D1 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		147	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		825	0,7146	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	48,8338	0,0000	0,0062	0,0000
1	606,5339	0,4851	0,0772	0,3300
2	1218,0859	0,8356	0,1551	0,5685
3	1814,0078	1,1861	0,2310	0,8069
4	2357,9480	1,5367	0,3002	1,0453
5	2834,5287	1,8956	0,3609	1,2895
6	3524,8527	2,5706	0,4488	1,7487
7	4044,1164	3,2838	0,5149	2,2339
8	4553,7247	4,3748	0,5798	2,9760
9	4960,2713	6,7663	0,6316	4,6029
10	4520,4154	6,9672	0,5756	4,7396

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4964,9287	7,1964	0,6322	4,8955

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,6318

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T30 D2 #1	Höhe [mm] 158	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 960	Rohdichte [g/cm ³] 0,7736	
Ergebnisse:				

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	39,3199	0,0000	0,0050	0,0000
1	809,6167	0,5749	0,1031	0,3639
2	1791,0988	1,0402	0,2280	0,6583
3	2736,0289	1,5054	0,3484	0,9528
4	3545,2902	1,9706	0,4514	1,2472
5	4217,2091	2,4366	0,5370	1,5422
6	5063,3500	3,1935	0,6447	2,0212
7	5820,7729	4,1264	0,7411	2,6117
8	6494,9400	5,3585	0,8270	3,3915
9	7103,9544	7,8631	0,9045	4,9766
10	6379,8386	7,2466	0,8123	4,5864

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7128,0161	8,4477	0,9076	5,3467

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9049

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T30 D2 #2	Höhe [mm] 157	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 960	Rohdichte [g/cm ³] 0,7785	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	41,8085	0,0000	0,0053	0,0000
1	663,0739	0,8404	0,0844	0,5353
2	1348,1239	1,2839	0,1716	0,8178
3	2200,3526	1,7273	0,2802	1,1002
4	2958,8360	2,1708	0,3767	1,3827
5	3590,9369	2,6142	0,4572	1,6651
6	4384,0952	3,3105	0,5582	2,1086
7	5132,3297	4,1974	0,6535	2,6735
8	5775,5544	5,3387	0,7354	3,4005
9	6335,9930	7,8337	0,8067	4,9896
10	5716,4994	8,9298	0,7278	5,6878

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
6341,5239	8,1181	0,8074	5,1708

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8069

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T30 D3 #1	Höhe [mm] 151	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 990	Rohdichte [g/cm ³] 0,8348	
Ergebnisse:				

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,4981	0,0000	0,0049	0,0000
1	999,7777	0,7227	0,1273	0,4786
2	2873,8186	1,2705	0,3659	0,8414
3	4668,1518	1,8184	0,5944	1,2042
4	6018,9911	2,3662	0,7664	1,5670
5	7072,4560	2,9140	0,9005	1,9298
6	7927,5956	3,4617	1,0094	2,2925
7	8739,7020	4,1033	1,1128	2,7174
8	9766,7057	5,1831	1,2435	3,4325
9	10569,1148	6,4869	1,3457	4,2960
10	10195,5815	6,5542	1,2981	4,3405

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10982,3340	8,3612	1,3983	5,5373

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,3888

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T30 D3 #2	Höhe [mm] 158	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 990	Rohdichte [g/cm ³] 0,7978	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg ΔL [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,2620	0,0000	0,0049	0,0000
1	754,0551	0,8142	0,0960	0,5153
2	1889,2371	1,3460	0,2405	0,8519
3	3192,1532	1,8778	0,4064	1,1885
4	4191,4196	2,4096	0,5337	1,5250
5	4975,9872	2,9413	0,6336	1,8616
6	5926,7073	3,8001	0,7546	2,4052
7	6766,5629	4,8656	0,8615	3,0795
8	7543,4077	6,3314	0,9605	4,0072
9	8165,9066	9,6049	1,0397	6,0791
10	7212,3826	8,4016	0,9183	5,3175

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8175,3906	10,0469	1,0409	6,3588

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,0211

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T30 D4 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		153	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		1040	0,8655	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,3747	0,0000	0,0048	0,0000
1	1240,1047	0,6681	0,1579	0,4367
2	3681,8545	1,2423	0,4688	0,8120
3	5861,7400	1,8166	0,7463	1,1873
4	7470,6840	2,3908	0,9512	1,5626
5	8714,0768	2,9651	1,1095	1,9380
6	9696,7500	3,5393	1,2346	2,3133
7	10511,7768	4,1368	1,3384	2,7038
8	11582,7726	5,2126	1,4748	3,4070
9	12424,1074	6,7054	1,5819	4,3826
10	11467,3570	7,0179	1,4601	4,5869

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
12628,2549	7,8513	1,6079	5,1315

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,6066

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T30 D4 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		150	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		1040	0,8828	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,0793	0,0000	0,0047	0,0000
1	1328,2971	0,6769	0,1691	0,4513
2	4141,5552	1,2609	0,5273	0,8406
3	6842,3993	1,8449	0,8712	1,2300
4	8789,5076	2,4289	1,1191	1,6193
5	10272,3897	3,0129	1,3079	2,0086
6	11429,5691	3,5969	1,4553	2,3979
7	12356,4661	4,1818	1,5733	2,7878
8	13312,8365	4,9803	1,6950	3,3202
9	14272,5219	6,2273	1,8172	4,1515
10	13618,2400	6,3217	1,7339	4,2145

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
14718,8857	8,1271	1,8741	5,4181

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,8709

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T30 D5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		155	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		1080	0,8872	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	39,4595	0,0000	0,0050	0,0000
1	1691,7032	0,6677	0,2154	0,4308
2	4860,4317	1,2975	0,6188	0,8371
3	7550,1300	1,9273	0,9613	1,2434
4	9461,2526	2,5571	1,2046	1,6498
5	10918,0497	3,1869	1,3901	2,0561
6	12073,3002	3,8167	1,5372	2,4624
7	13007,8952	4,4482	1,6562	2,8698
8	14099,9399	5,4084	1,7953	3,4893
9	15111,0669	6,7439	1,9240	4,3509
10	14770,7001	6,0255	1,8807	3,8874

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
15649,5664	8,6534	1,9926	5,5828

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,9773

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T30 D5 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		150	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		1080	0,9167	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,5472	0,0000	0,0048	0,0000
1	2111,8034	0,7376	0,2689	0,4918
2	6831,3337	1,4287	0,8698	0,9525
3	10541,2544	2,1198	1,3422	1,4132
4	13136,1863	2,8109	1,6726	1,8740
5	15094,6858	3,5021	1,9219	2,3347
6	16607,8304	4,1932	2,1146	2,7954
7	17803,2568	4,8843	2,2668	3,2562
8	18831,6276	5,6465	2,3977	3,7643
9	20037,4991	6,9870	2,5513	4,6580
10	19083,5103	5,8886	2,4298	3,9257

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
20626,2383	8,6843	2,6262	5,7895

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,6037

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D1 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		136	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		850	0,7958	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,1691	0,0006	0,0045	0,0004
1	9801,2398	1,5130	1,2479	1,1125
2	18583,4605	3,0194	2,3661	2,2201
3	23624,0860	4,5257	3,0079	3,3277
4	26561,5865	6,0320	3,3819	4,4353
5	29051,6648	8,1883	3,6990	6,0208
6	31362,5541	12,0148	3,9932	8,8344
7	33303,4195	20,0307	4,2403	14,7284
8	34759,0177	30,9439	4,4257	22,7529
9	36339,7330	41,0206	4,6269	30,1622
10	37850,5929	27,7778	4,8193	20,4248

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
38014,1816	49,9714	4,8401	36,7437

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,5133

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D1 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		137	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		865	0,8039	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,7633	0,0005	0,0042	0,0004
1	7382,3989	1,3901	0,9400	1,0146
2	14491,8216	2,7872	1,8452	2,0345
3	20242,2366	4,1844	2,5773	3,0543
4	24252,6432	5,5815	3,0879	4,0741
5	26707,1018	6,9820	3,4005	5,0963
6	29071,8174	9,1844	3,7015	6,7040
7	31163,7571	12,9191	3,9679	9,4300
8	32907,9312	20,7949	4,1900	15,1788
9	33720,5663	32,0547	4,2934	23,3976
10	27066,8158	19,5961	3,4463	14,3037

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
33756,0403	30,8161	4,2980	22,4935

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,3745

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T40 D2 #1	Höhe [mm] 139	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 990	Rohdichte [g/cm ³] 0,9068	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg ΔL [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,2291	0,0002	0,0046	0,0001
1	2532,3347	0,9619	0,3224	0,6920
2	6316,0846	1,8394	0,8042	1,3233
3	10023,2066	2,7169	1,2762	1,9546
4	13343,4509	3,5943	1,6989	2,5858
5	16500,8119	4,4718	2,1009	3,2171
6	19077,4097	5,3493	2,4290	3,8484
7	21054,6403	6,2267	2,6808	4,4797
8	22618,8630	7,1159	2,8799	5,1193
9	24042,3369	8,2821	3,0612	5,9584
10	23403,6316	6,7194	2,9798	4,8341

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
24858,0957	10,0091	3,1650	7,2008

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,8496

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T40 D2 #2	Höhe [mm] 154	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 1050	Rohdichte [g/cm ³] 0,8681	
Ergebnisse:				

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	33,8331	0,0001	0,0043	0,0000
1	1189,7639	1,8918	0,1515	1,2285
2	2665,3652	2,8779	0,3394	1,8688
3	4686,5879	3,7357	0,5967	2,4258
4	6989,7619	4,5934	0,8900	2,9827
5	9396,8714	5,4512	1,1964	3,5398
6	11552,1691	6,3090	1,4709	4,0967
7	13189,1324	7,1668	1,6793	4,6538
8	14485,1607	8,0979	1,8443	5,2584
9	15931,2153	9,8689	2,0284	6,4084
10	15445,4426	8,7863	1,9666	5,7054

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
16581,1797	13,8276	2,1112	8,9790

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,7814

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T40 D3 #1	Höhe [mm] 149	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 1090	Rohdichte [g/cm ³] 0,9314	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	33,9006	0,0001	0,0043	0,0001
1	1454,3359	1,4369	0,1852	0,9644
2	4644,2322	2,3542	0,5913	1,5800
3	9215,7824	3,2598	1,1734	2,1878
4	13951,8952	4,1653	1,7764	2,7955
5	17783,0314	5,0709	2,2642	3,4033
6	20628,2154	5,9765	2,6265	4,0111
7	22739,5521	6,8820	2,8953	4,6188
8	24265,7127	8,0273	3,0896	5,3875
9	25541,9179	10,4590	3,2521	7,0195
10	24651,9723	8,0996	3,1388	5,4360

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
26289,2969	11,4238	3,3473	7,6670

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0498

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T40 D3 #2	Höhe [mm] 147	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 1090	Rohdichte [g/cm ³] 0,9441	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg ΔL [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	1322,3228	0,0003	0,1684	0,0002
1	1733,7641	1,5803	0,2207	1,0750
2	4449,1385	2,6588	0,5665	1,8087
3	8296,3138	3,7373	1,0563	2,5424
4	12483,0013	4,8158	1,5894	3,2760
5	16663,9969	5,8943	2,1217	4,0097
6	20460,0679	6,9728	2,6051	4,7434
7	23598,0357	8,0513	3,0046	5,4771
8	25931,7345	9,1298	3,3017	6,2107
9	27621,6234	10,3098	3,5169	7,0135
10	26239,9367	8,0791	3,3410	5,4960

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
28469,8516	11,7510	3,6249	7,9938

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,7954

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D4 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		155	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		1140	0,9364	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,0088	0,0001	0,0043	0,0001
1	3290,4218	1,0034	0,4189	0,6473
2	9804,6043	1,8488	1,2484	1,1928
3	14648,9416	2,6943	1,8652	1,7382
4	18252,8942	3,5397	2,3240	2,2837
5	20948,0846	4,3851	2,6672	2,8291
6	22959,5737	5,2306	2,9233	3,3746
7	24481,3015	6,0760	3,1171	3,9200
8	25780,3023	7,0590	3,2825	4,5542
9	27219,5550	8,7635	3,4657	5,6539
10	26770,9971	7,4790	3,4086	4,8251

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
28055,2969	11,6240	3,5721	7,4993

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,3646

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T40 D4 #2	Höhe [mm] 151	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 1140	Rohdichte [g/cm ³] 0,9613	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg ΔL [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	50,6386	0,0001	0,0064	0,0001
1	3943,3923	0,9120	0,5021	0,6040
2	11168,9712	1,8402	1,4221	1,2187
3	17804,4659	2,7683	2,2669	1,8333
4	22815,4803	3,6965	2,9050	2,4480
5	26259,0488	4,6247	3,3434	3,0627
6	28678,8108	5,5529	3,6515	3,6774
7	30380,8487	6,4819	3,8682	4,2926
8	31858,8893	7,6696	4,0564	5,0792
9	33322,3974	9,8692	4,2427	6,5359
10	31536,1886	8,1945	4,0153	5,4268

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
33733,2109	11,7215	4,2950	7,7626

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
4,0605

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T40 D5 #1	Höhe [mm] 155	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 1180	Rohdichte [g/cm ³] 0,9693	
	Ergebnisse:			
Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	33,9782	0,0002	0,0043	0,0001
1	3782,3222	1,2425	0,4816	0,8016
2	10940,5701	2,2517	1,3930	1,4527
3	17478,2409	3,2609	2,2254	2,1038
4	22927,3424	4,2701	2,9192	2,7549
5	26932,7537	5,2792	3,4292	3,4059
6	29621,5954	6,2884	3,7715	4,0570
7	31478,4530	7,2976	4,0080	4,7081
8	33109,5843	8,6167	4,2156	5,5592
9	34728,0640	10,9088	4,4217	7,0379
10	34136,9461	9,5396	4,3465	6,1546
maximale Druckkraft F_{\max} [N]		Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
35589,0938		15,1476	4,5313	9,7726
			Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]	
			4,0898	
Kraft-Weg-Diagramm		Spannungs-Dehnungs-Diagramm		

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T40 D5 #2	Höhe [mm] 157	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g] 1160	Rohdichte [g/cm ³] 0,9407	
	Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	33,8669	0,0002	0,0043	0,0001
1	3975,6757	1,1518	0,5062	0,7336
2	10670,3854	2,1384	1,3586	1,3620
3	16392,1195	3,1249	2,0871	1,9904
4	20734,0900	4,1115	2,6399	2,6188
5	24029,9767	5,0981	3,0596	3,2472
6	26446,1545	6,0846	3,3672	3,8756
7	28158,4526	7,0729	3,5852	4,5050
8	29817,2669	8,5471	3,7965	5,4440
9	31284,0362	11,3932	3,9832	7,2568
10	28485,9035	9,0757	3,6269	5,7807

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31485,6836	12,9935	4,0089	8,2761

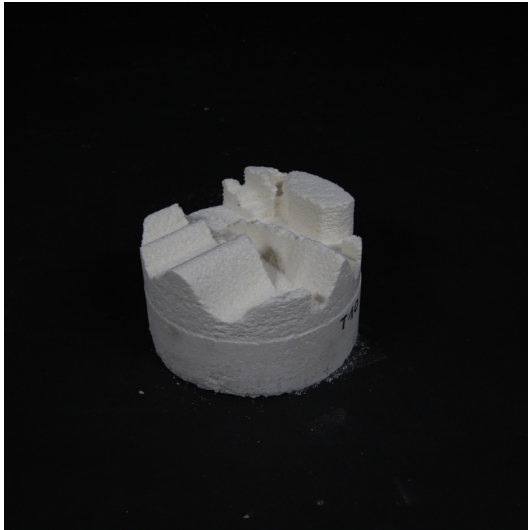
Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,6974

Kraft-Weg-Diagramm

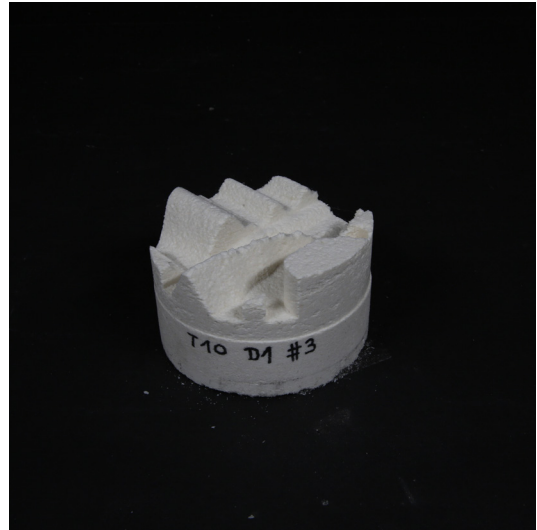
Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



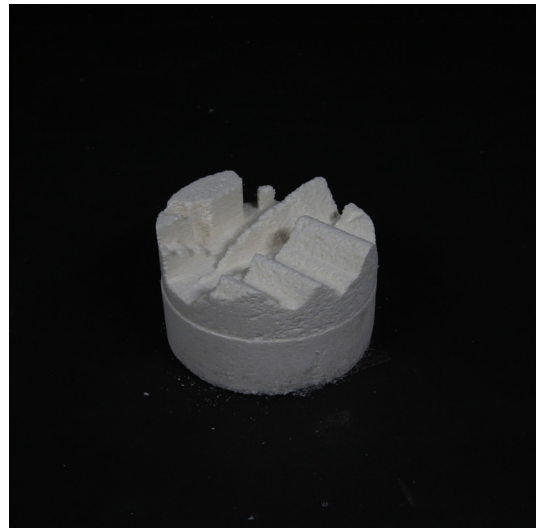
Fräsen T10 D1 #1



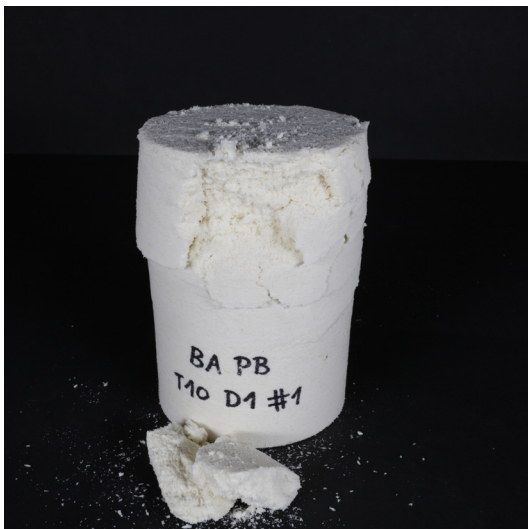
Fräsen T10 D1 #2



Fräsen T10 D1 #3



Fräsen T10 D1 #4



T10 D1 #1.1



T10 D1 #1.2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

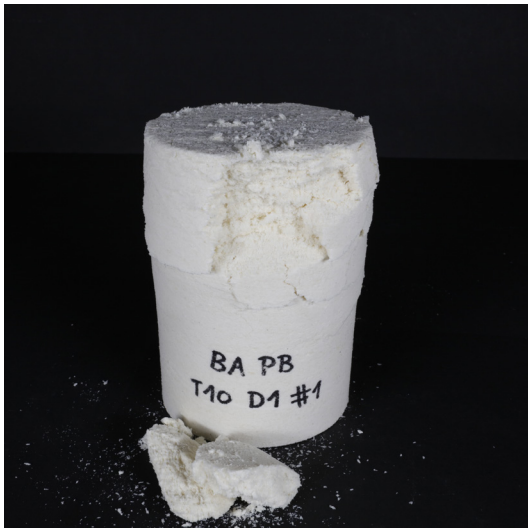
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



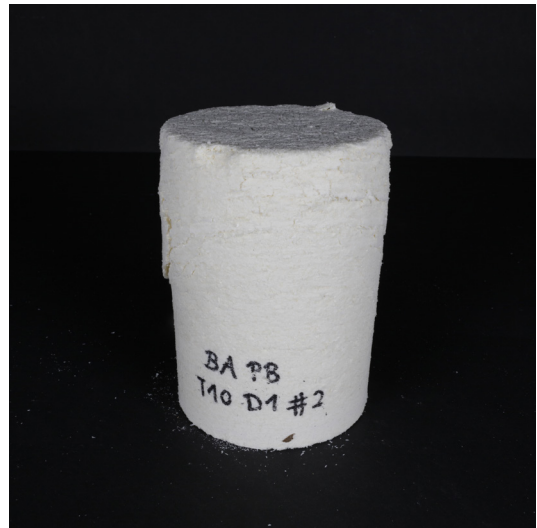
T10 D1 #1.3



T10 D1 #1.4



T10 D1 #1.5



T10 D1 #2.1



T10 D1 #2.2



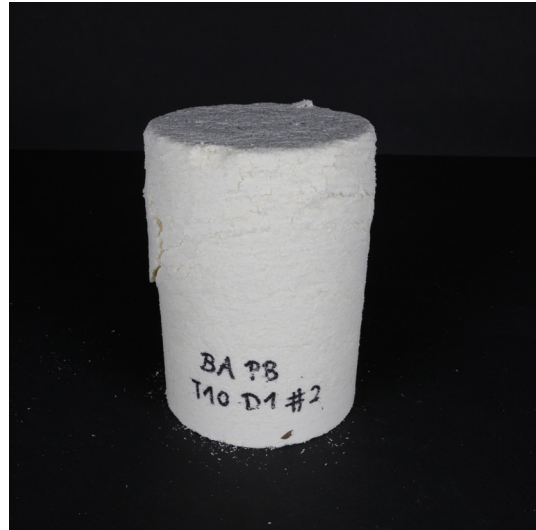
T10 D1 #2.3

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

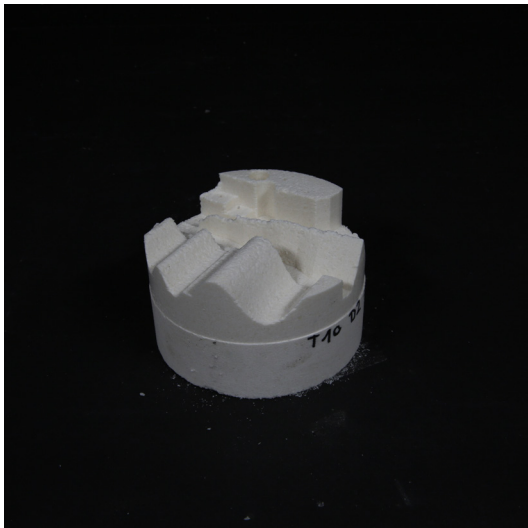
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



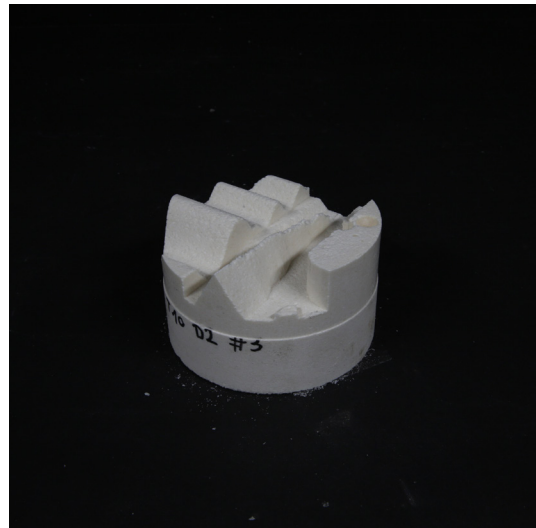
T10 D1 #2.4



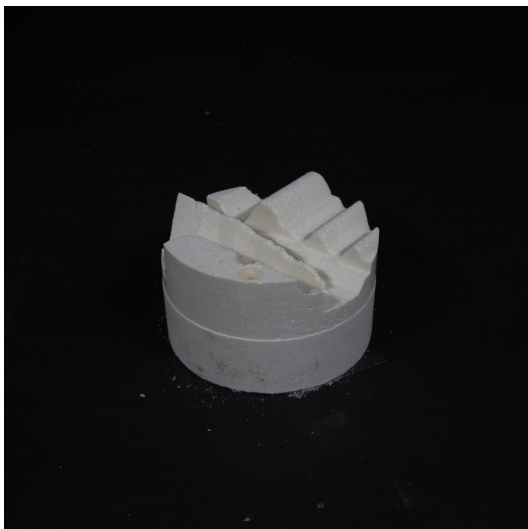
T10 D1 #2.5



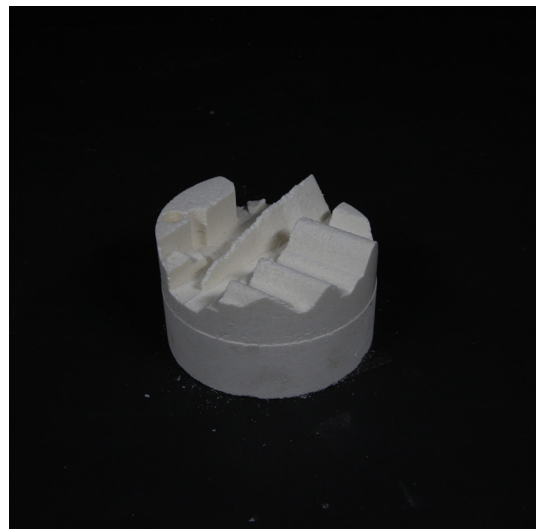
Fräsen T10 D2 #1



Fräsen T10 D2 #2



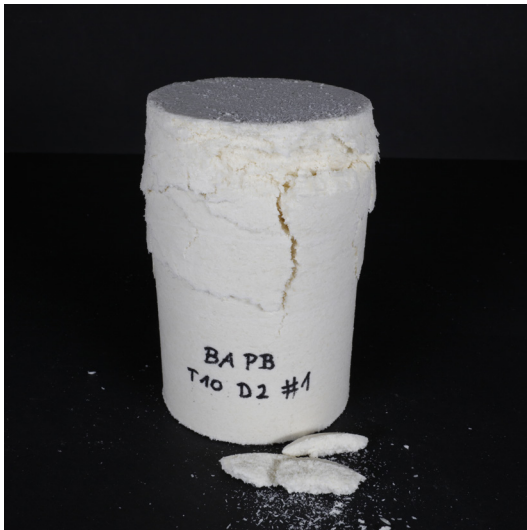
Fräsen T10 D2 #3



Fräsen T10 D2 #4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T10 D2 #1.1



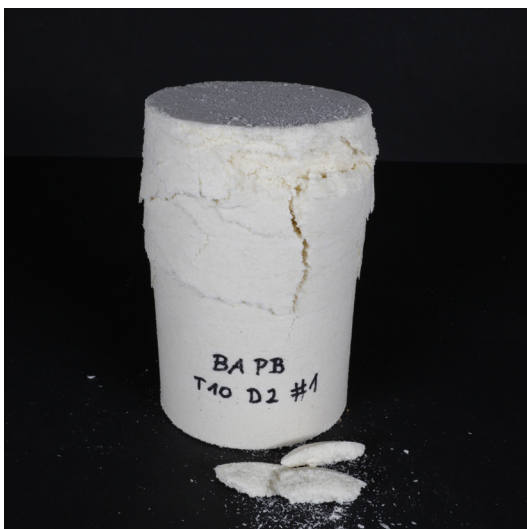
T10 D2 #1.2



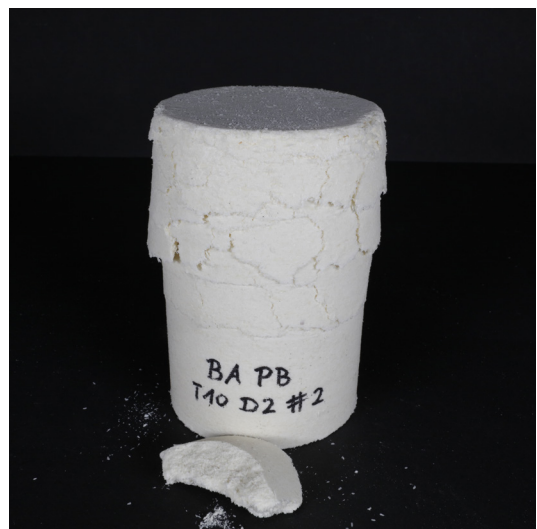
T10 D2 #1.3



T10 D2 #1.4



T10 D2 #1.5



T10 D2 #2.1

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



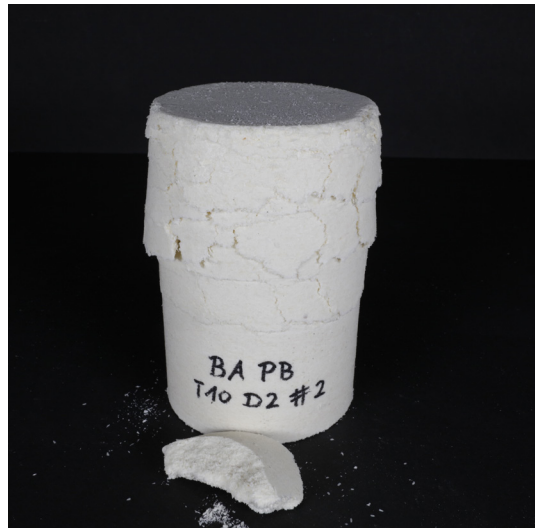
T10 D2 #2.2



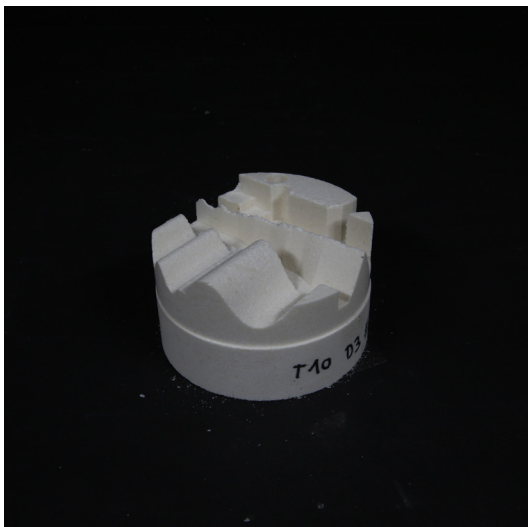
T10 D2 #2.3



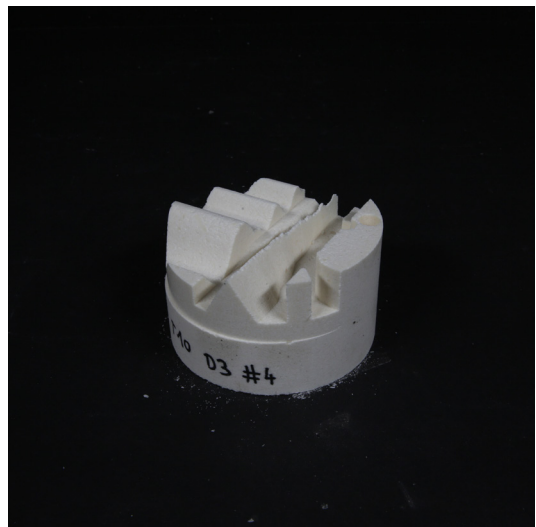
T10 D2 #2.4



T10 D2 #2.5



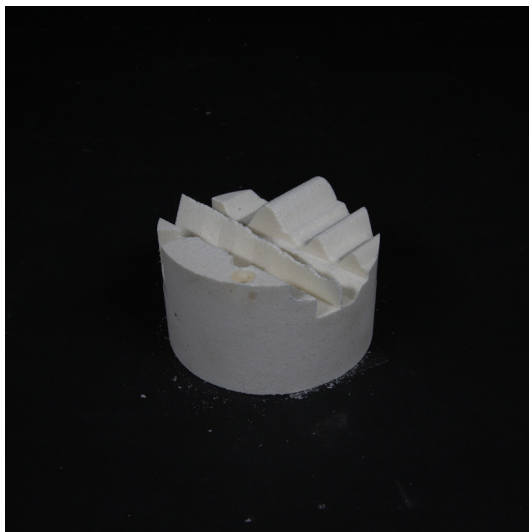
Fräsen T10 D3 #1



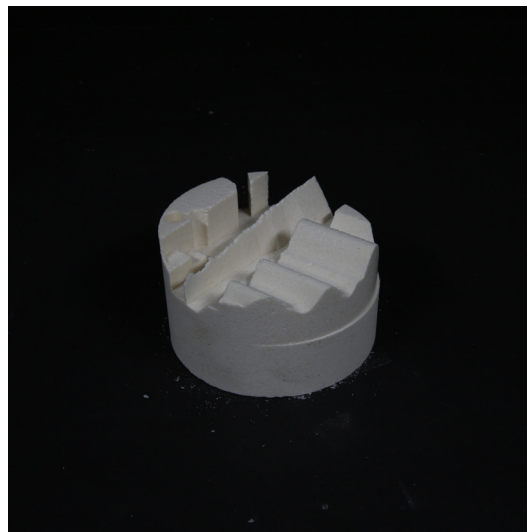
Fräsen T10 D3 #2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



Fräsen T10 D3 #3



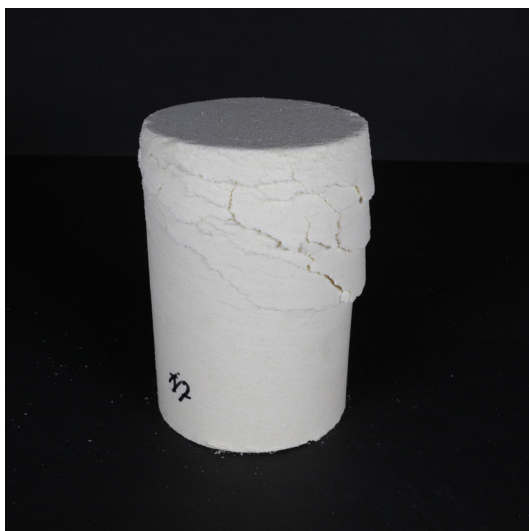
Fräsen T10 D3 #4



T10 D3 #2.1



T10 D3 #2.2



T10 D3 #2.3



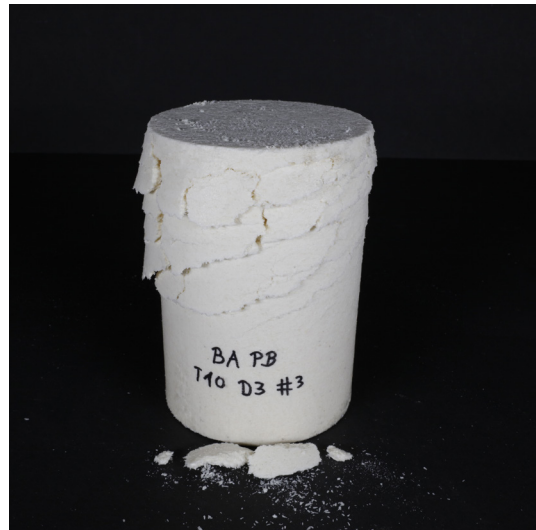
T10 D3 #2.4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T10 D3 #2.5



T10 D3 #3.1



T10 D3 #3.2



T10 D3 #3.3



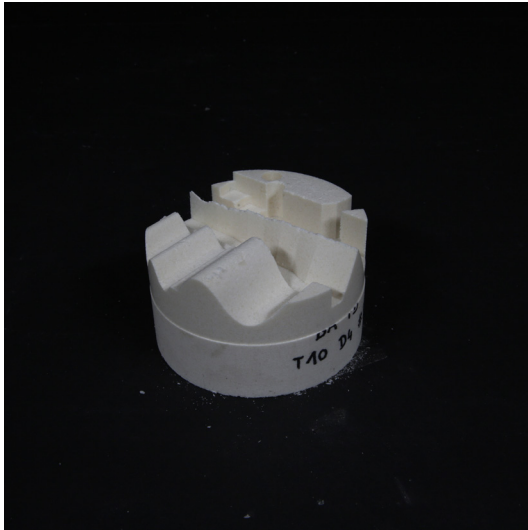
T10 D3 #3.4



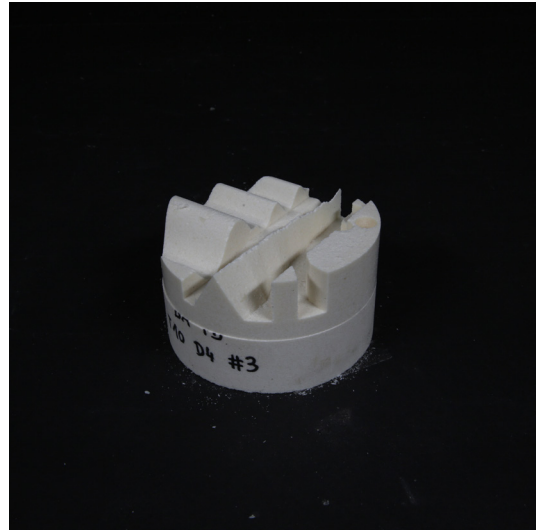
T10 D3 #3.5

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

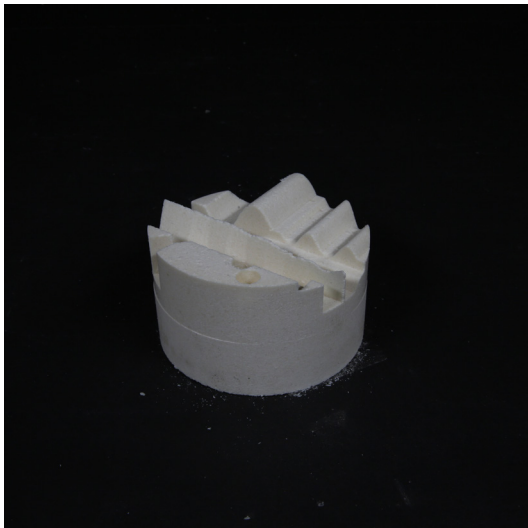
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



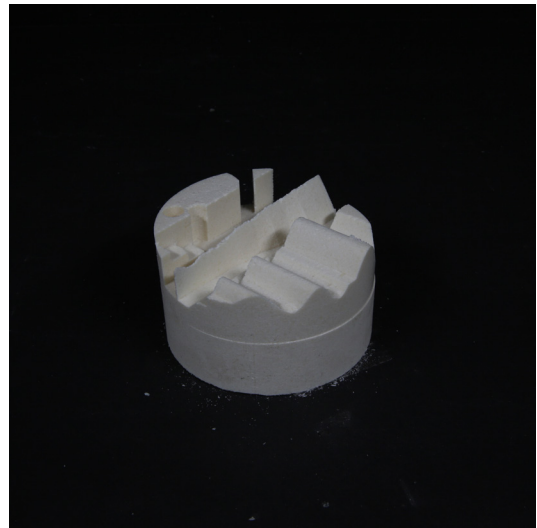
Fräsen T10 D4 #1



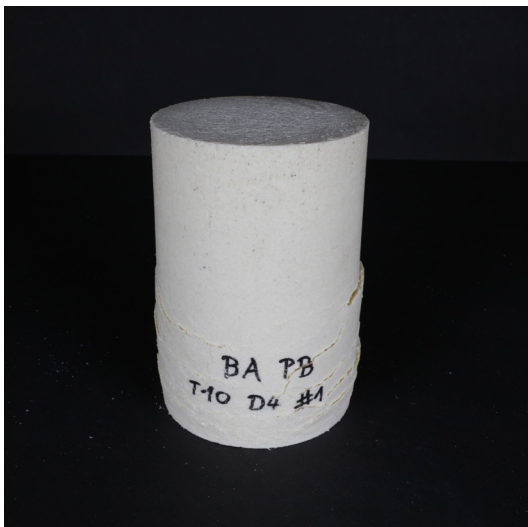
Fräsen T10 D4 #2



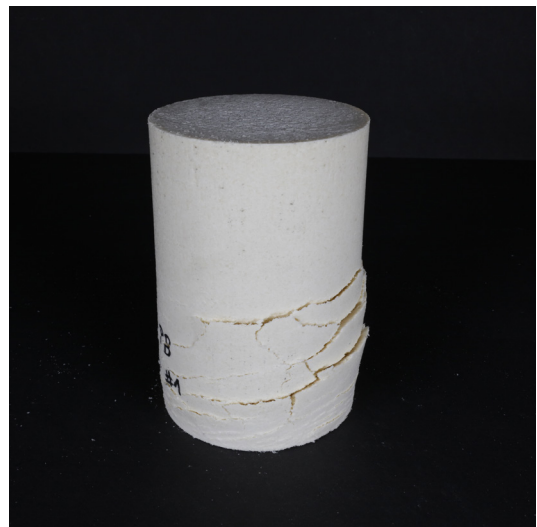
Fräsen T10 D4 #3



Fräsen T10 D4 #4



T10 D4 #1.1



T10 D4 #1.2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

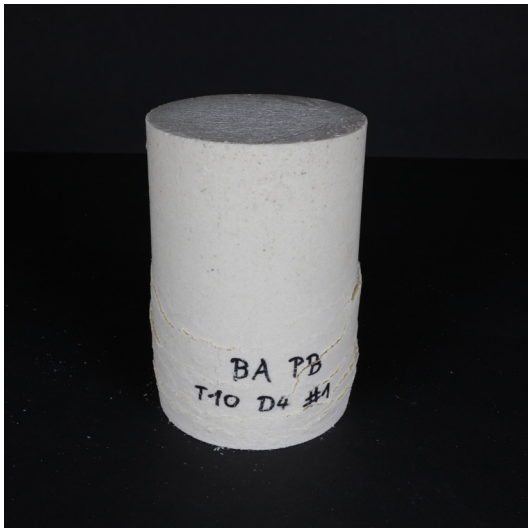
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



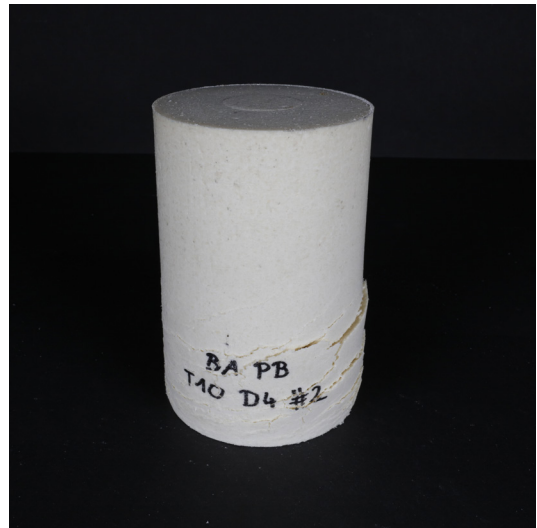
T10 D4 #1.3



T10 D4 #1.4



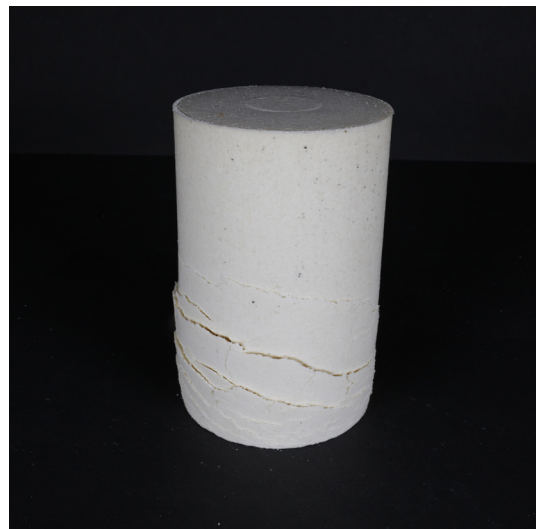
T10 D4 #1.5



T10 D4 #2.1



T10 D4 #2.2



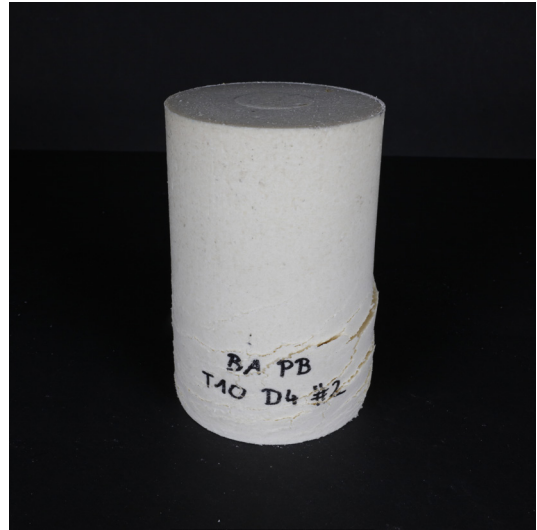
T10 D4 #2.3

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

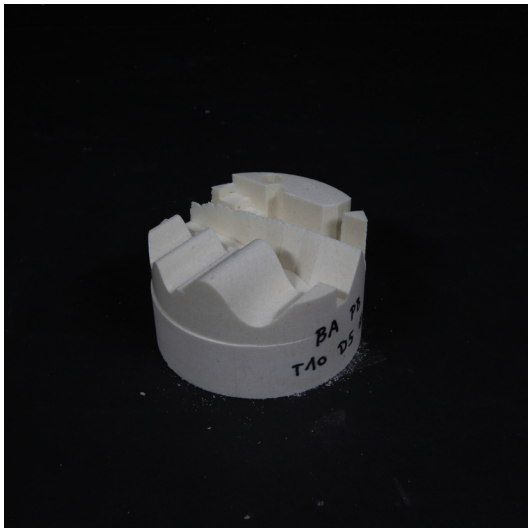
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



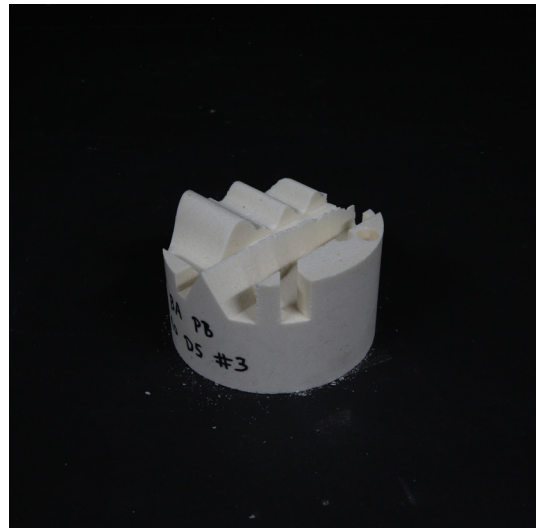
T10 D4 #2.4



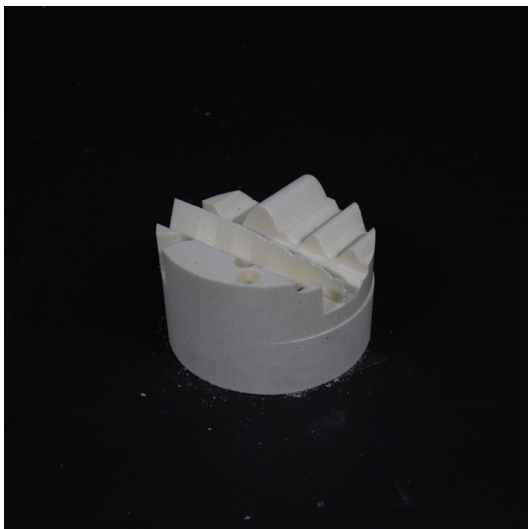
T10 D4 #2.5



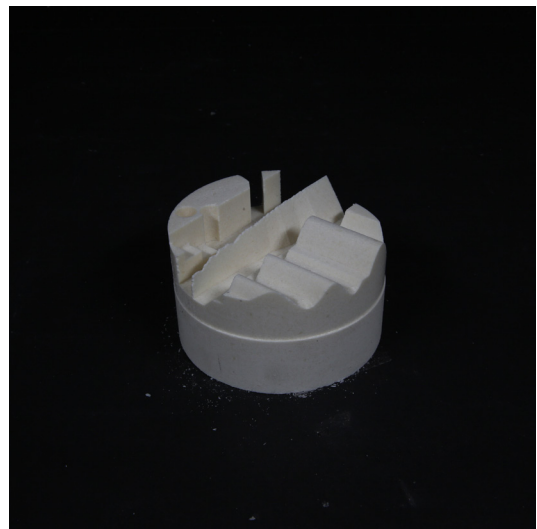
Fräsen T10 D5 #1



Fräsen T10 D5 #2



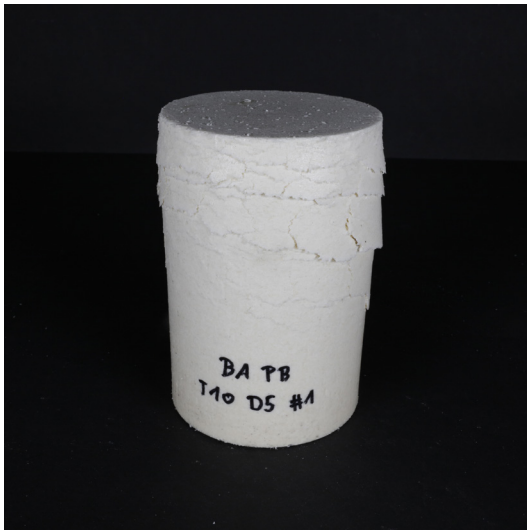
Fräsen T10 D5 #3



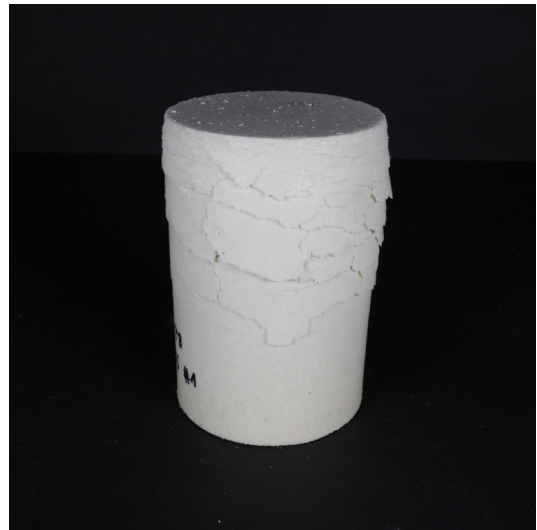
Fräsen T10 D5 #4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

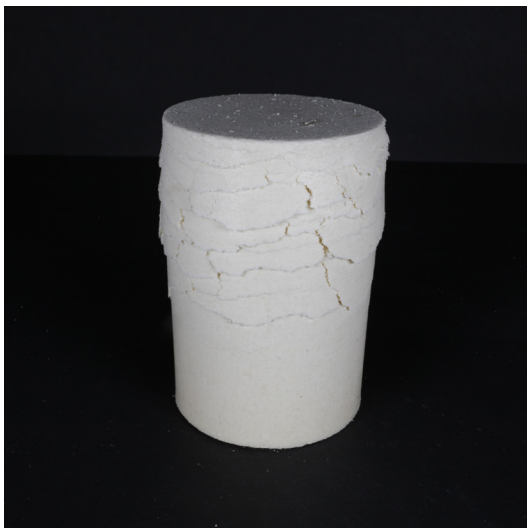
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T10 D5 #1.1



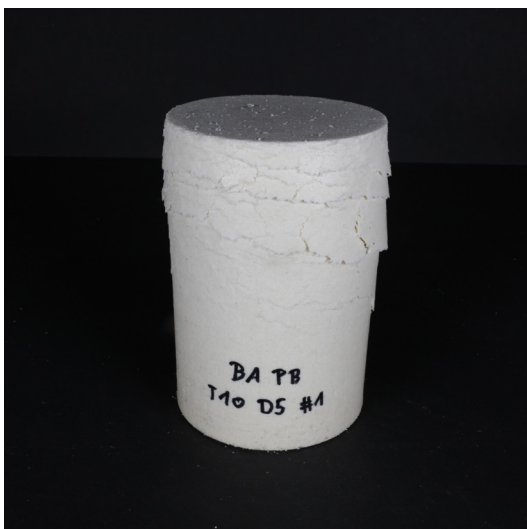
T10 D5 #1.2



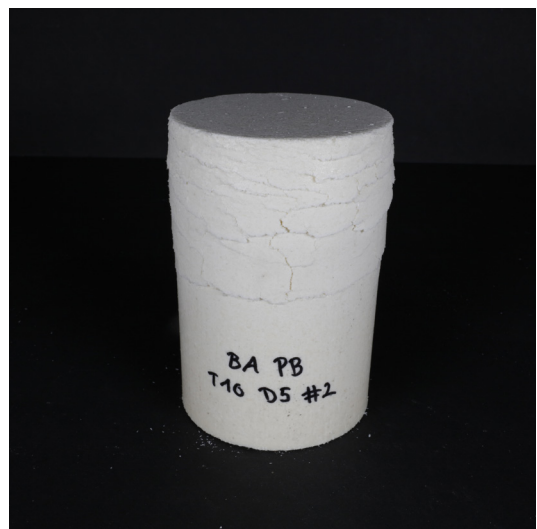
T10 D5 #1.3



T10 D5 #1.4



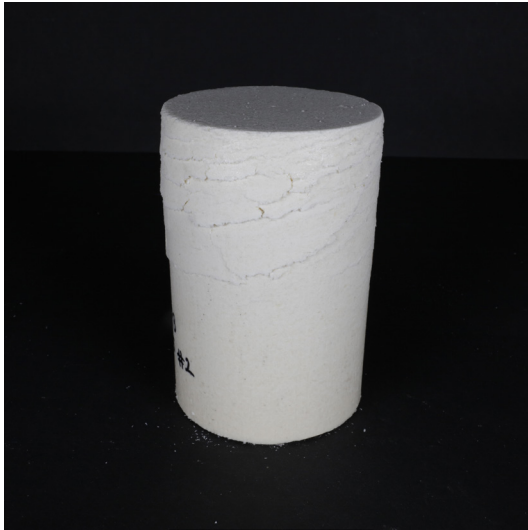
T10 D5 #1.5



T10 D5 #2.1

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



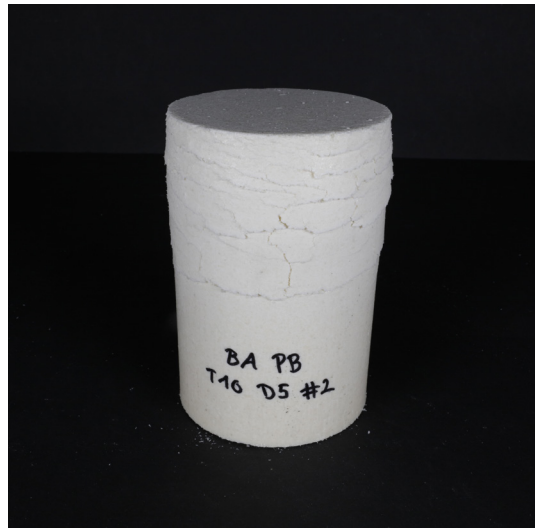
T10 D5 #2.2



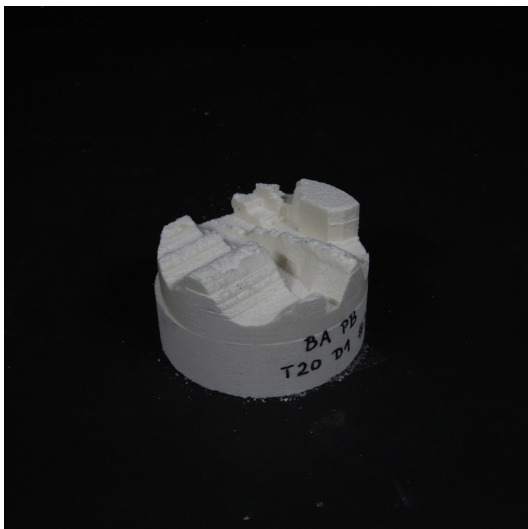
T10 D5 #2.3



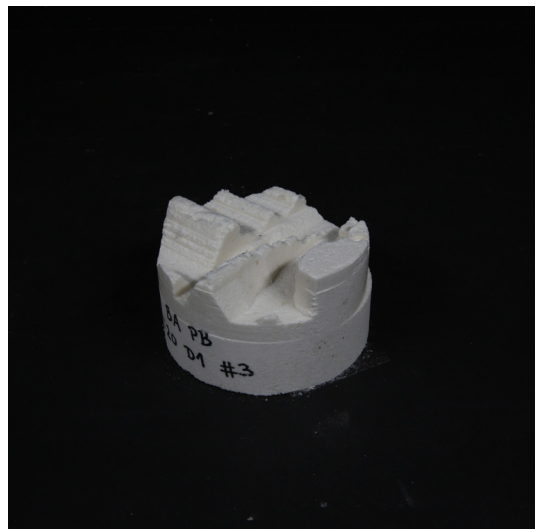
T10 D5 #2.4



T10 D5 #2.5



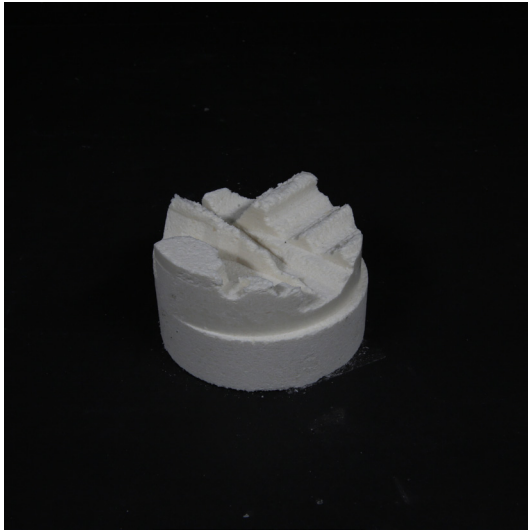
Fräsen T20 D1 #1



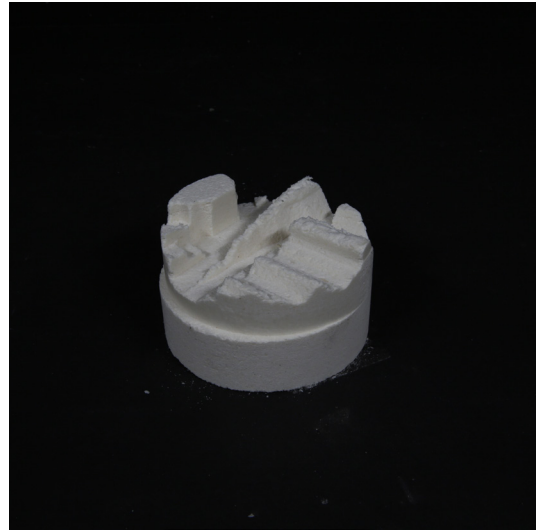
Fräsen T20 D1 #2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

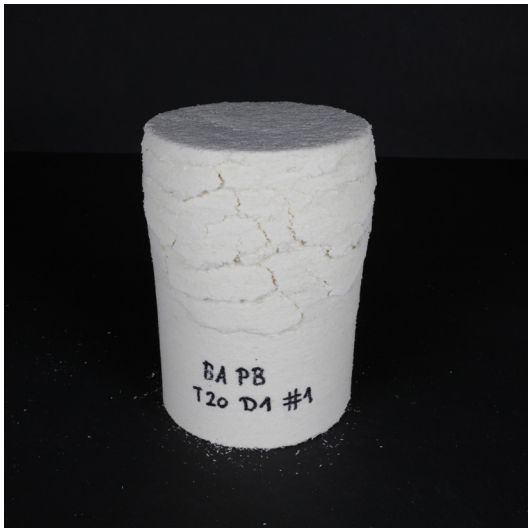
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



Fräsen T20 D1 #3



Fräsen T20 D1 #4



T20 D1 #1.1



T20 D1 #1.2



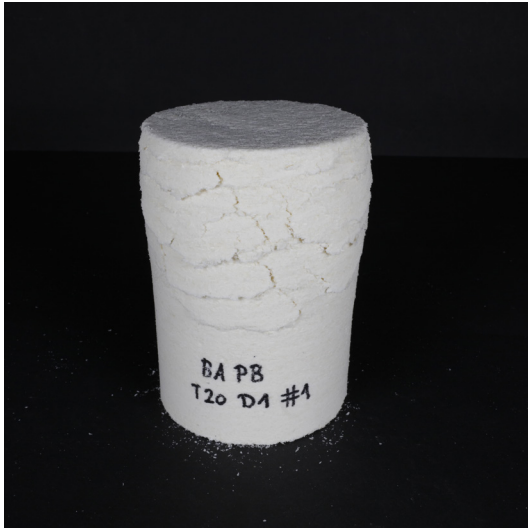
T20 D1 #1.3



T20 D1 #1.4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T20 D1 #1.5



T20 D1 #2.1



T20 D1 #2.2



T20 D1 #2.3



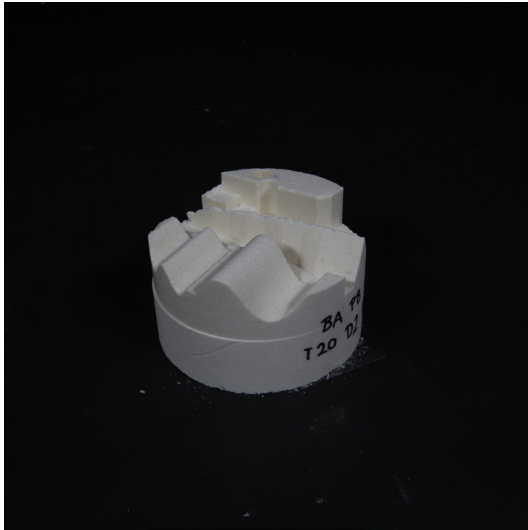
T20 D1 #2.4



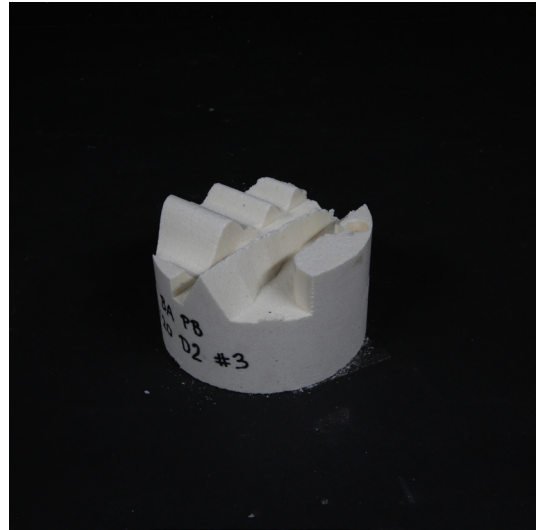
T20 D1 #2.5

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

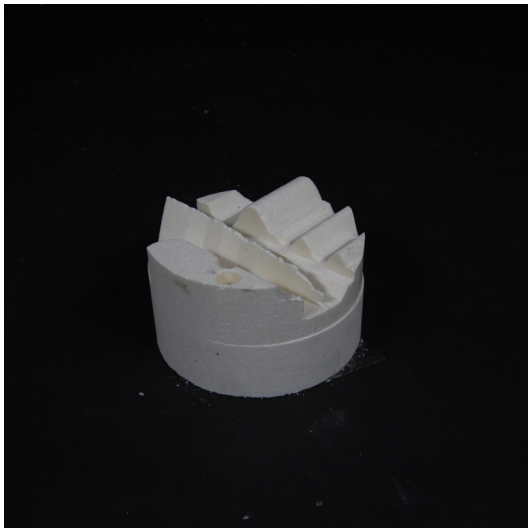
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



Fräsen T20 D2 #1



Fräsen T20 D2 #2



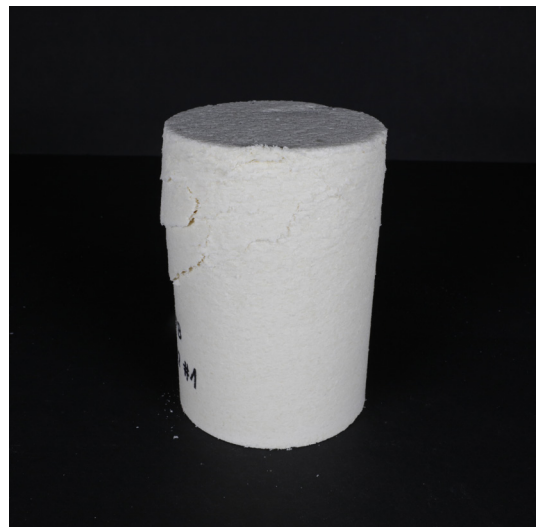
Fräsen T20 D2 #3



Fräsen T20 D2 #4



T20 D2 #1.1



T20 D2 #1.2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

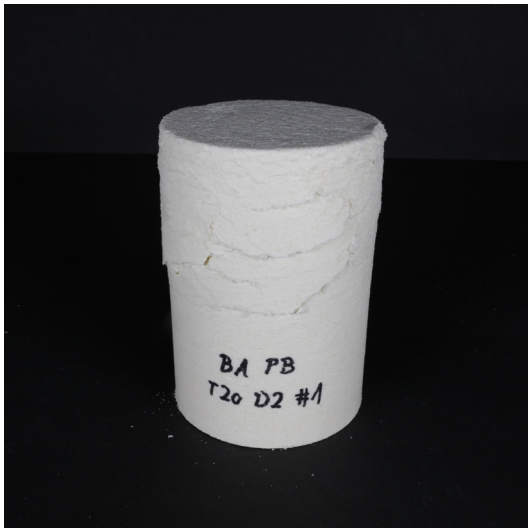
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T20 D2 #1.3



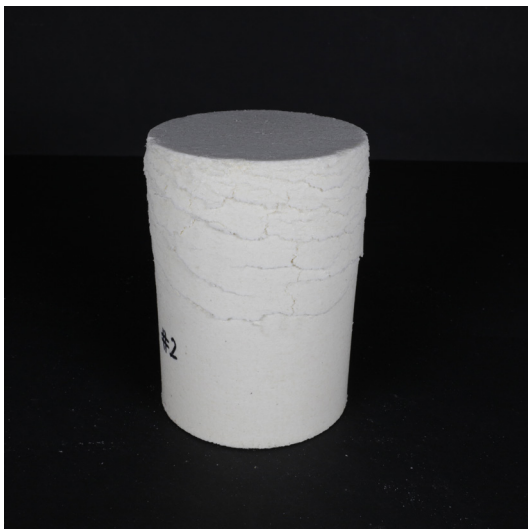
T20 D2 #1.4



T20 D2 #1.5



T20 D2 #2.1



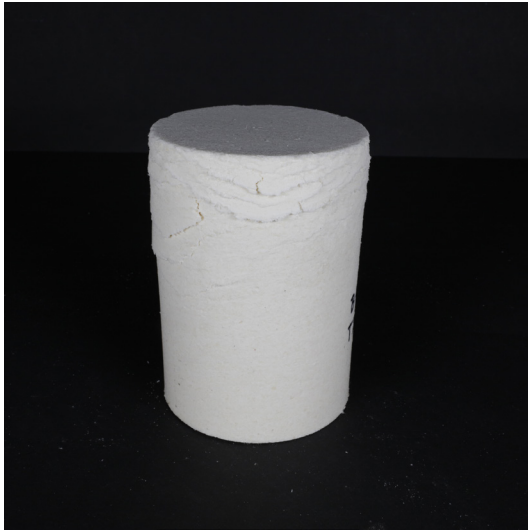
T20 D2 #2.2



T20 D2 #2.3

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

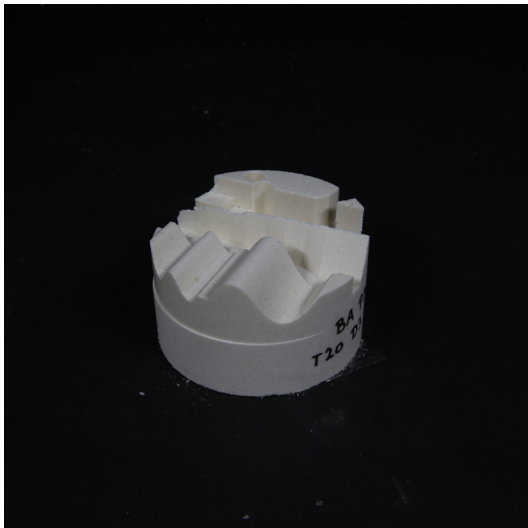
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



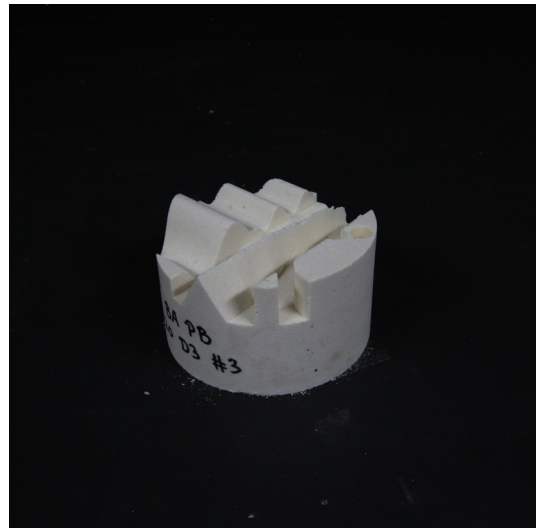
T20 D2 #2.4



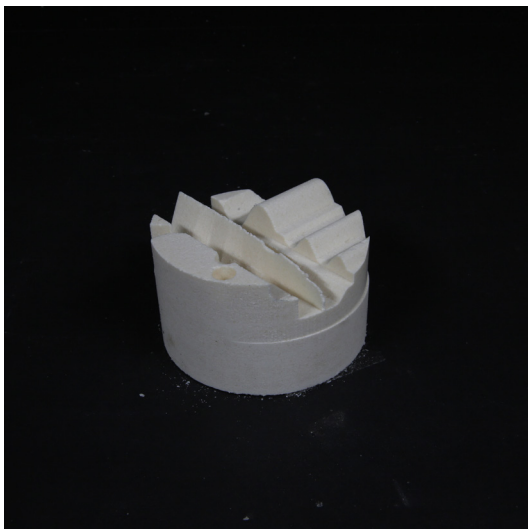
T20 D2 #2.5



Fräsen T20 D3 #1



Fräsen T20 D3 #2



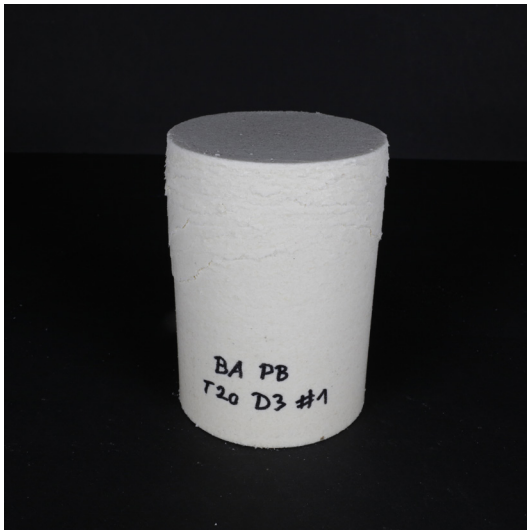
Fräsen T20 D3 #3



Fräsen T20 D3 #4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

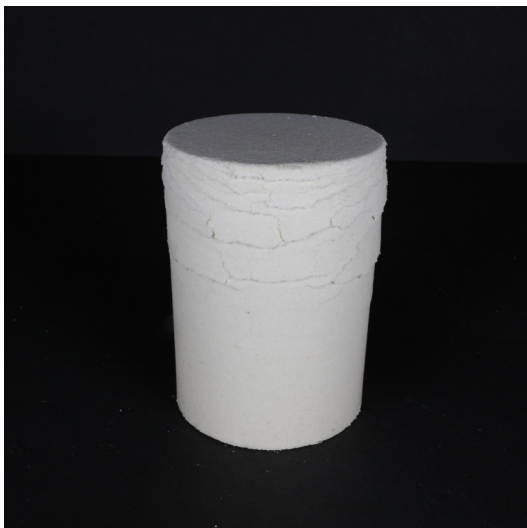
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T20 D3 #1.1



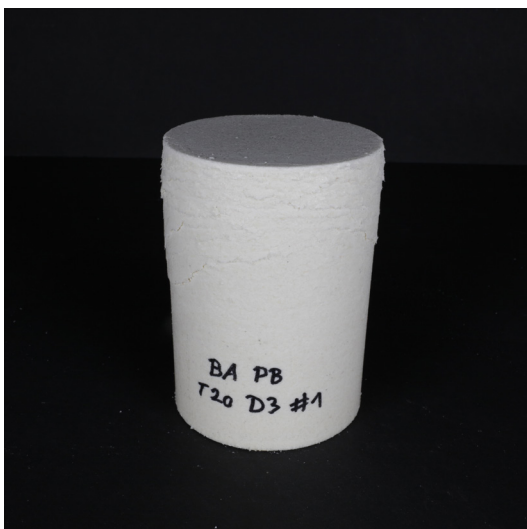
T20 D3 #1.2



T20 D3 #1.3



T20 D3 #1.4



T20 D3 #1.5



T20 D3 #2.1

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T20 D3 #2.2



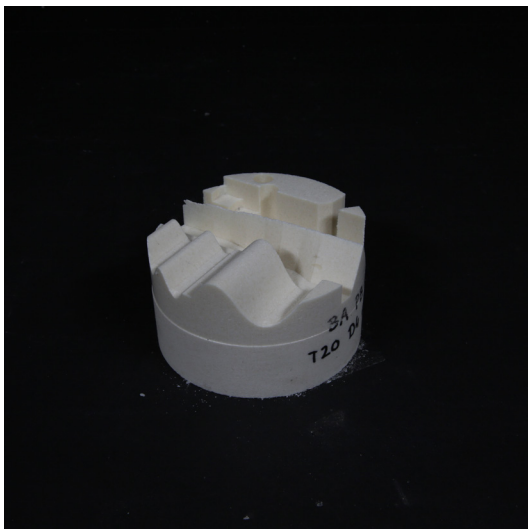
T20 D3 #2.3



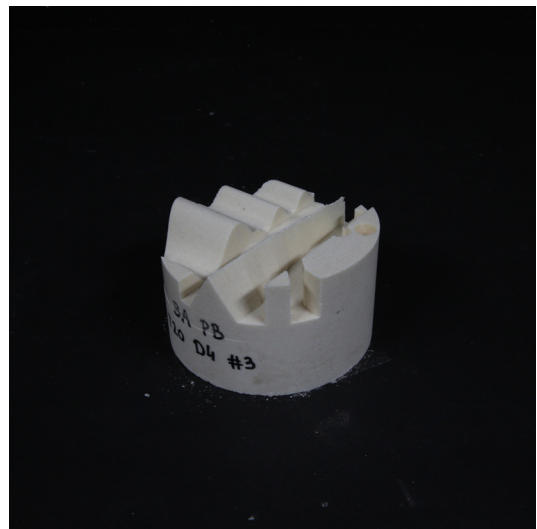
T20 D3 #2.4



T20 D3 #2.5



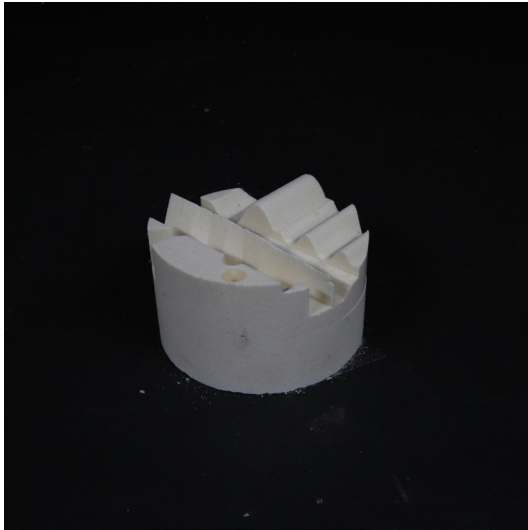
Fräsen T20 D4 #1



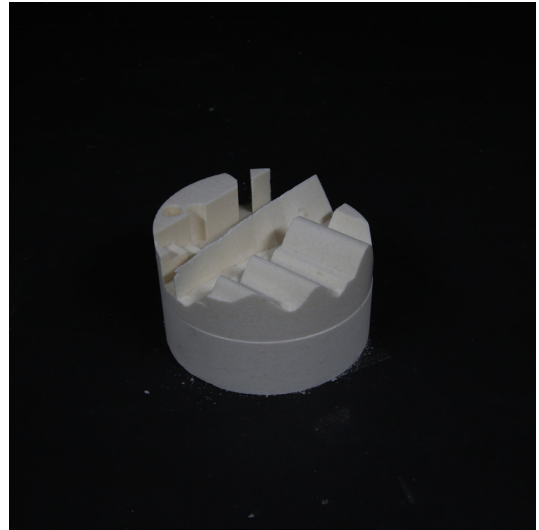
Fräsen T20 D4 #2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



Fräsen T20 D4 #3



Fräsen T20 D4 #4



T20 D4 #1.1



T20 D4 #1.2



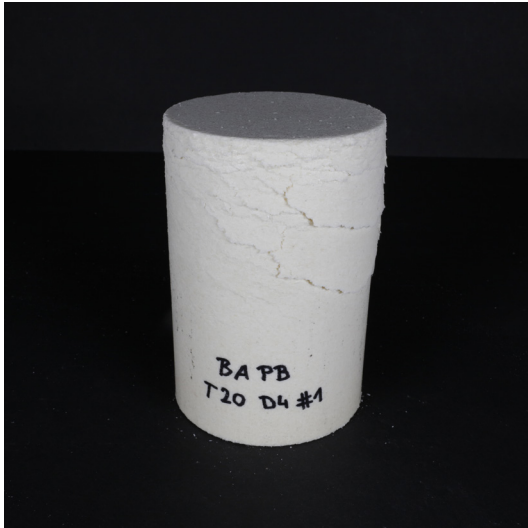
T20 D4 #1.3



T20 D4 #1.4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

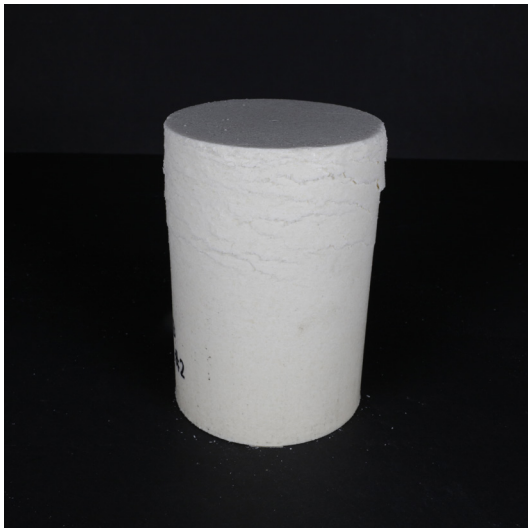
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T20 D4 #1.5



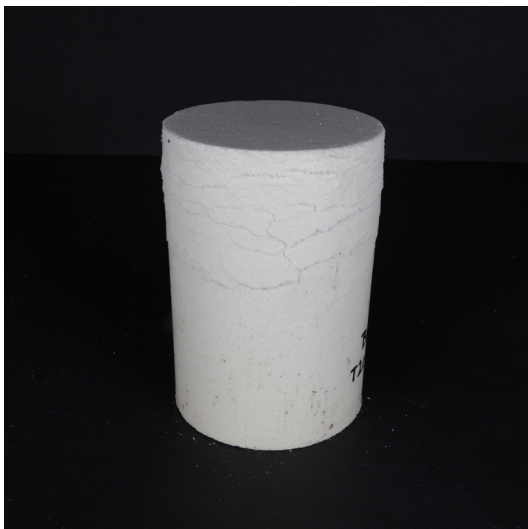
T20 D4 #2.1



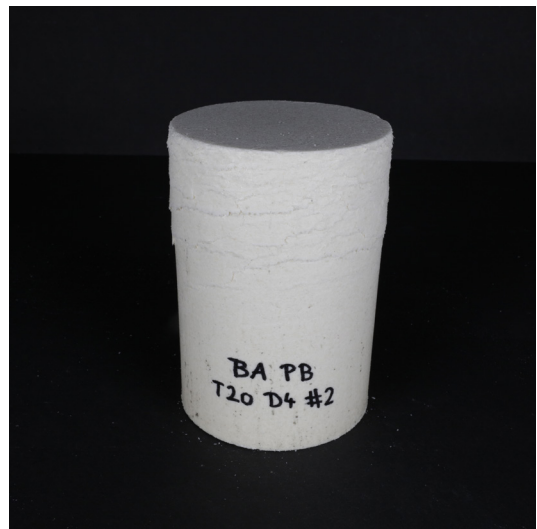
T20 D4 #2.2



T20 D4 #2.3



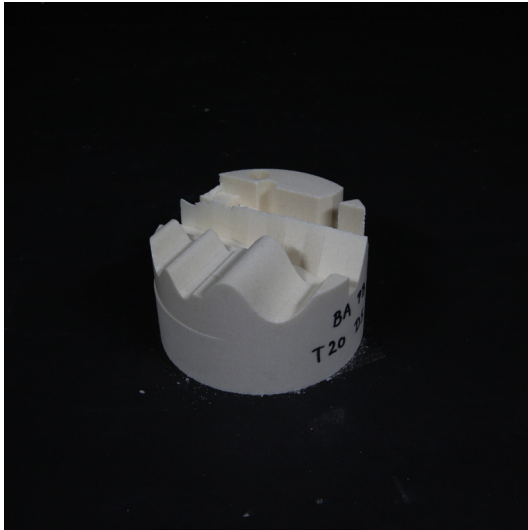
T20 D4 #2.4



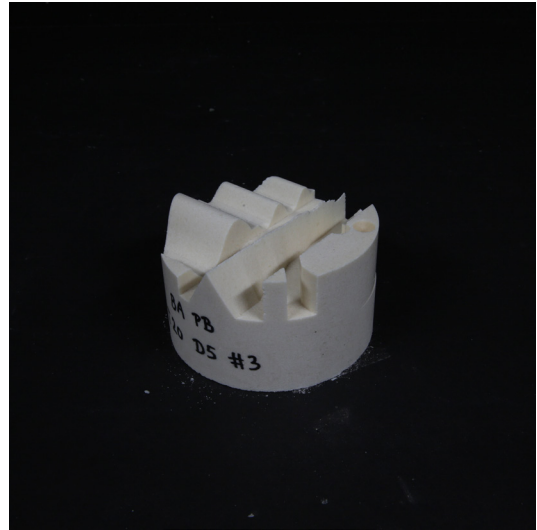
T20 D4 #2.5

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

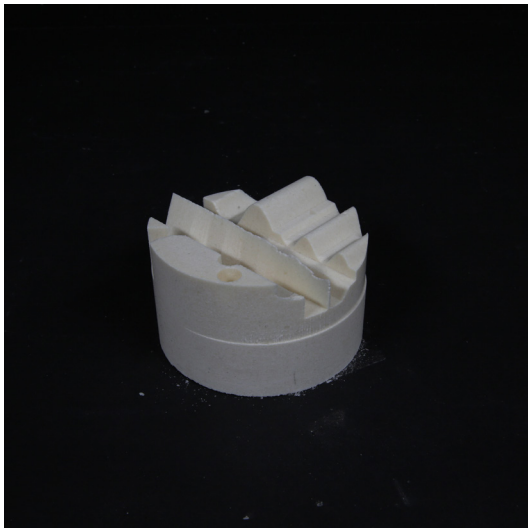
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



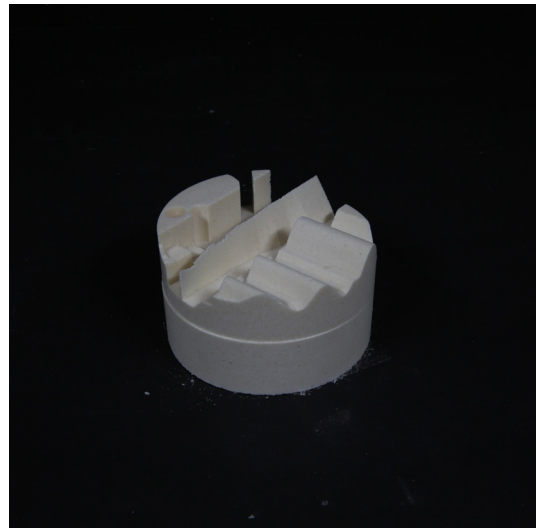
Fräsen T20 D5 #1



Fräsen T20 D5 #2



Fräsen T20 D5 #3



Fräsen T20 D5 #4



T20 D5 #1.1



T20 D5 #1.2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

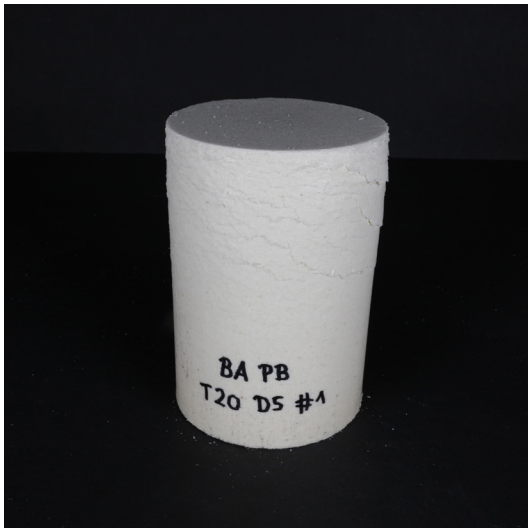
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T20 D5 #1.3



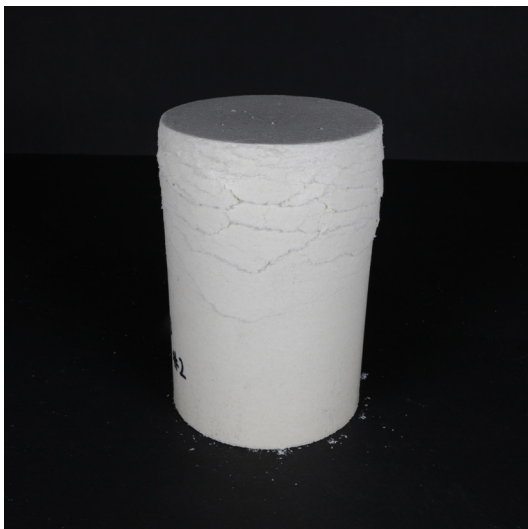
T20 D5 #1.4



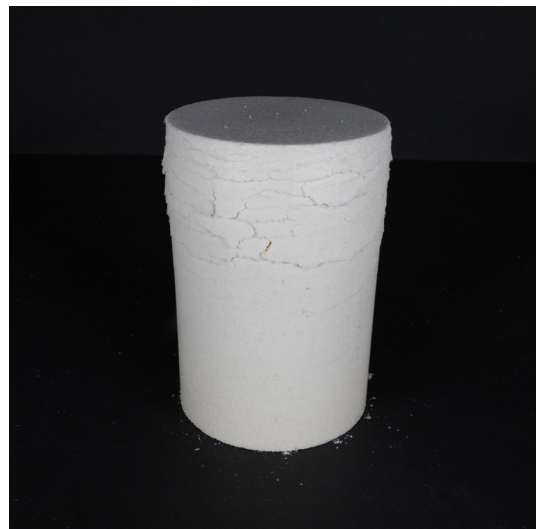
T20 D5 #1.5



T20 D5 #2.1



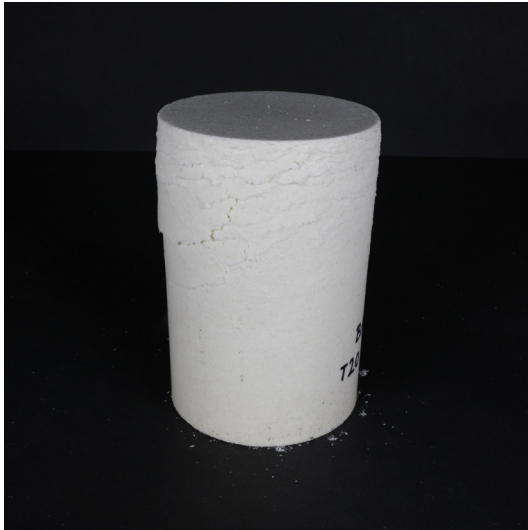
T20 D5 #2.2



T20 D5 #2.3

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

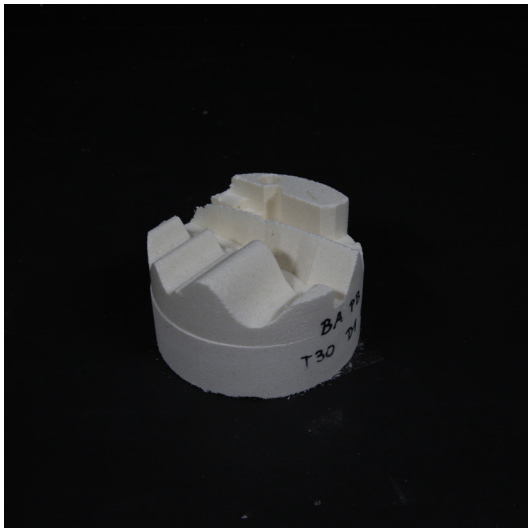
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



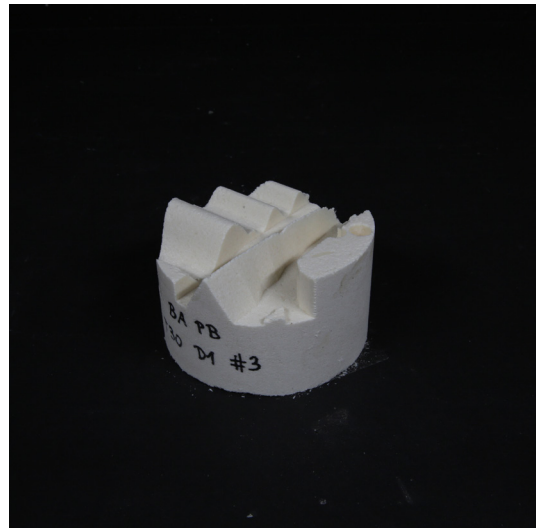
T20 D5 #2.4



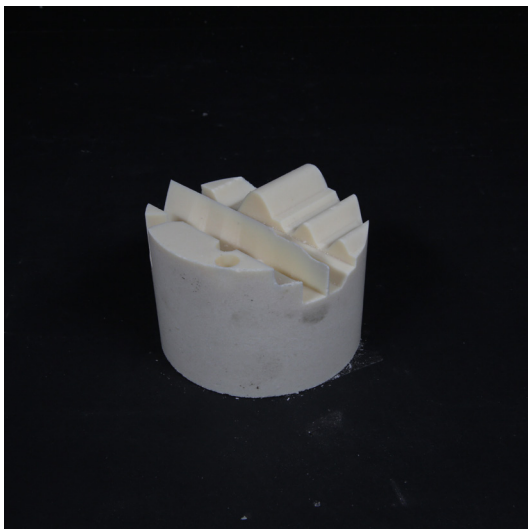
T20 D5 #2.5



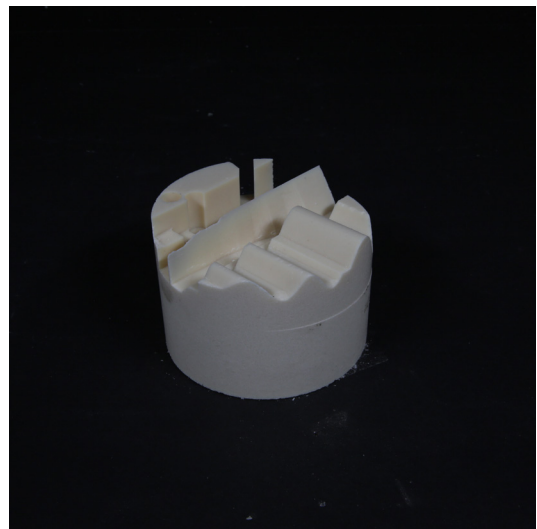
Fräsen T30 D1 #1



Fräsen T30 D1 #2



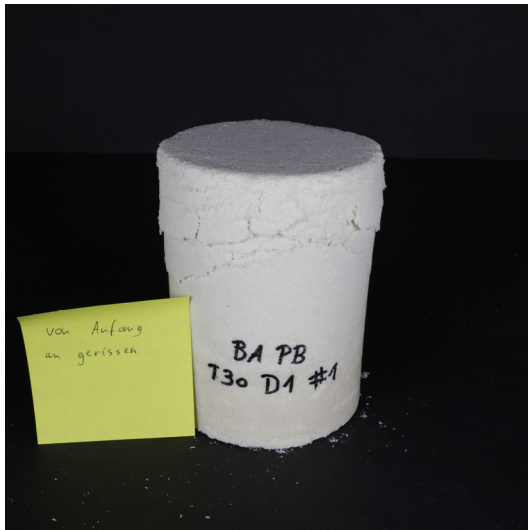
Fräsen T30 D1 #3



Fräsen T30 D1 #4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T30 D1 #1.1



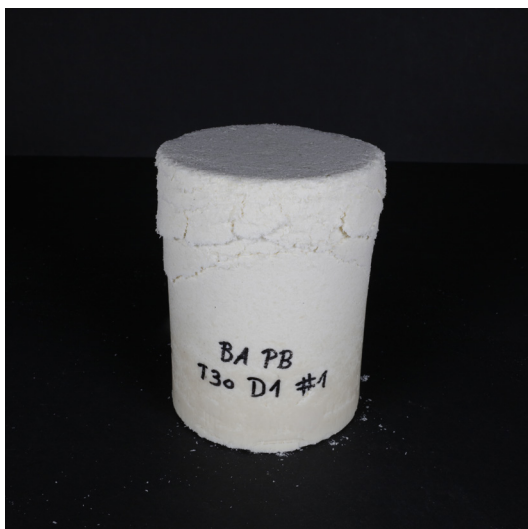
1 T30 D1 #1.2



T30 D1 #1.3



T30 D1 #1.4



T30 D1 #1.5



T30 D1 #2.1

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



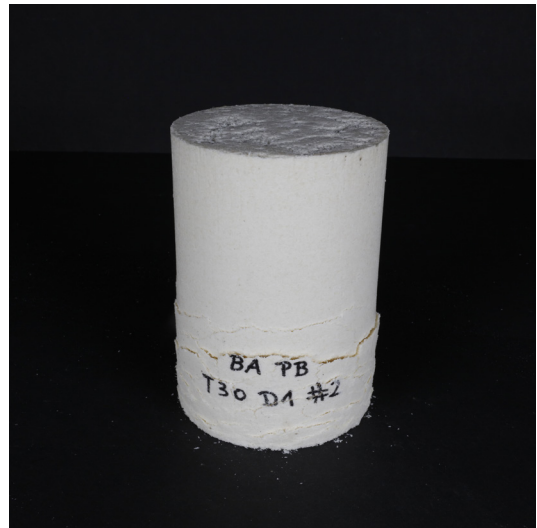
T30 D1 #2.2



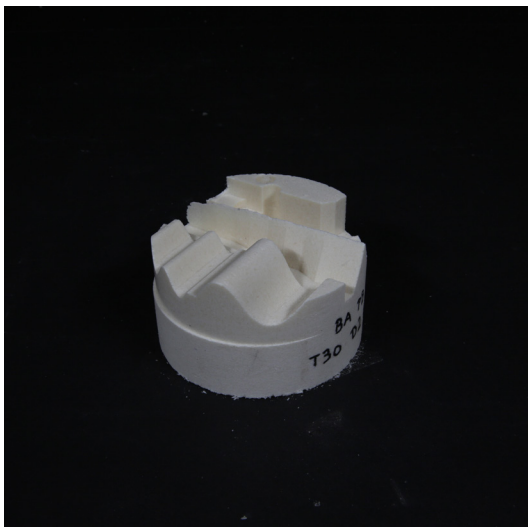
T30 D1 #2.3



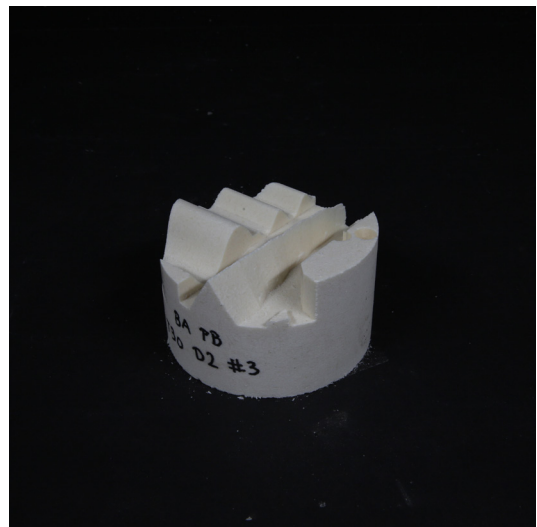
T30 D1 #2.4



T30 D1 #2.5



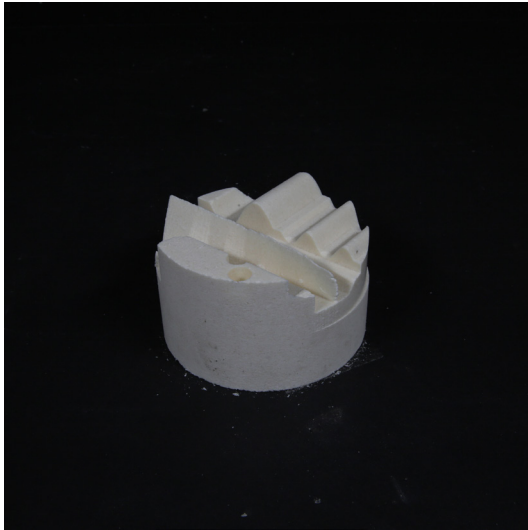
Fräsen T30 D2 #1



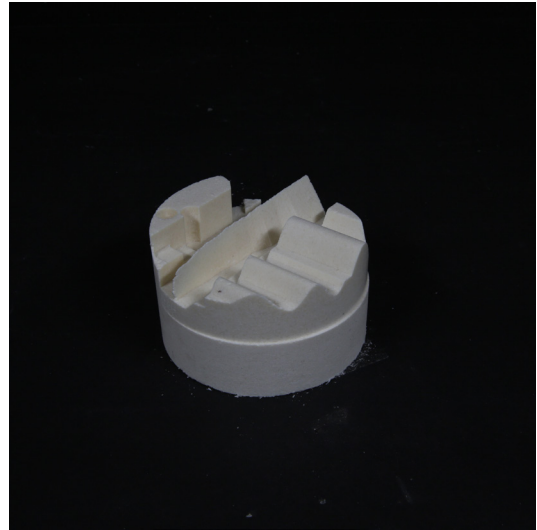
Fräsen T30 D2 #2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



Fräsen T30 D2 #3



Fräsen T30 D2 #4



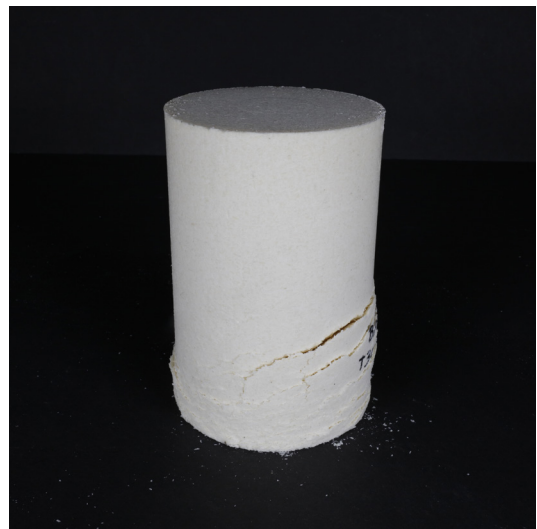
T30 D2 #1.1



T30 D2 #1.2



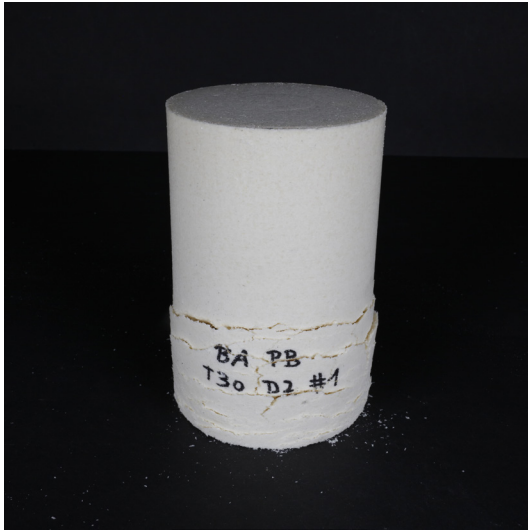
T30 D2 #1.3



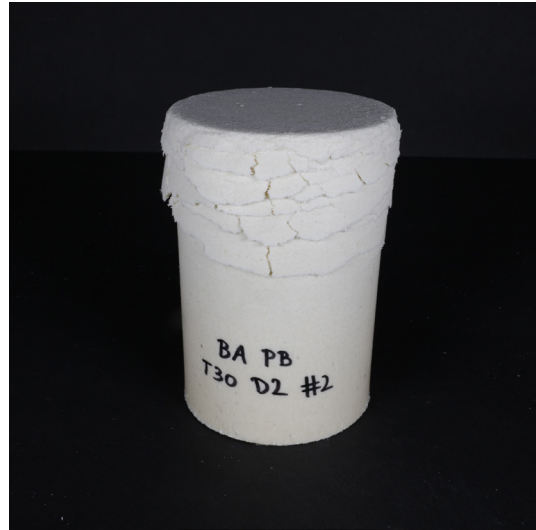
T30 D2 #1.4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

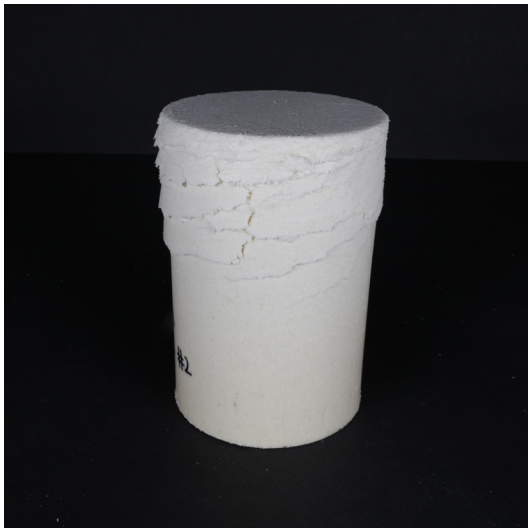
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T30 D2 #1.5



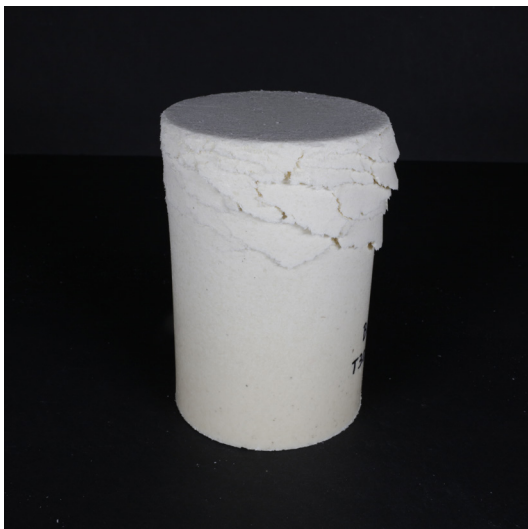
T30 D2 #2.1



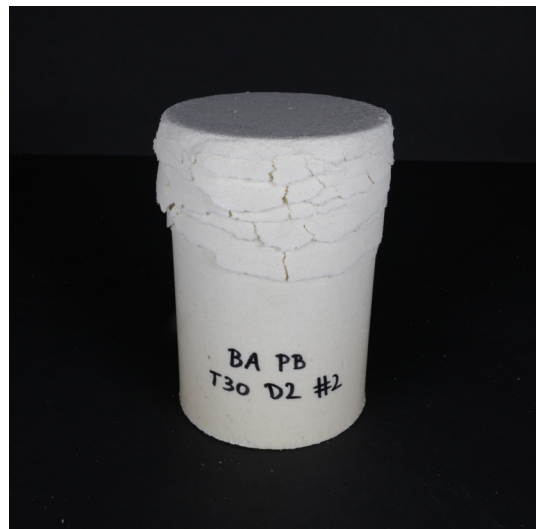
T30 D2 #2.2



T30 D2 #2.3



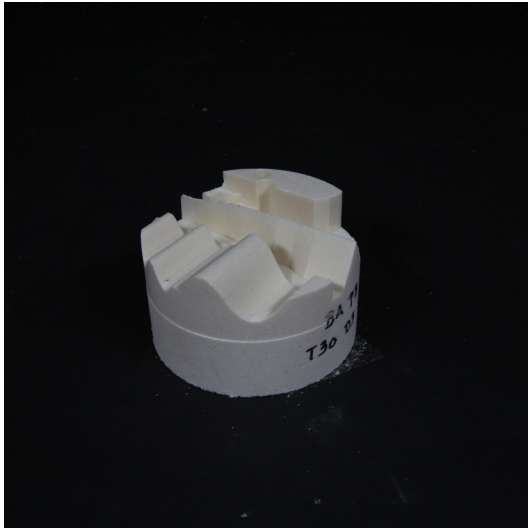
T30 D2 #2.4



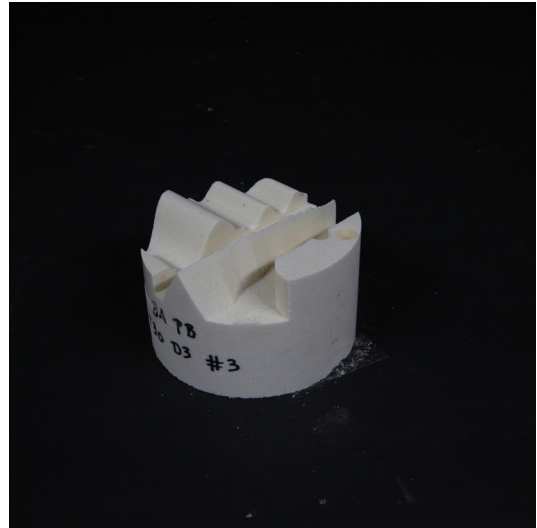
T30 D2 #2.5

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

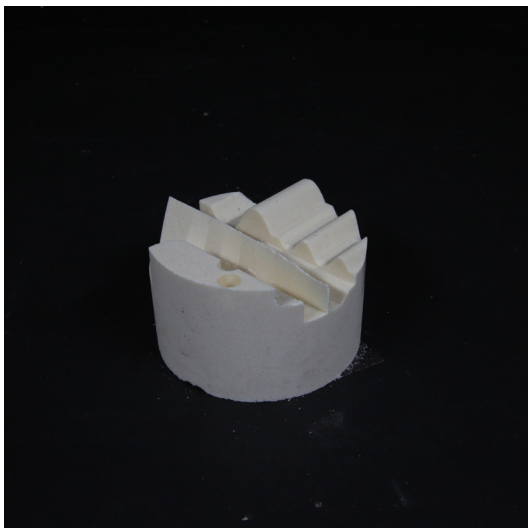
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



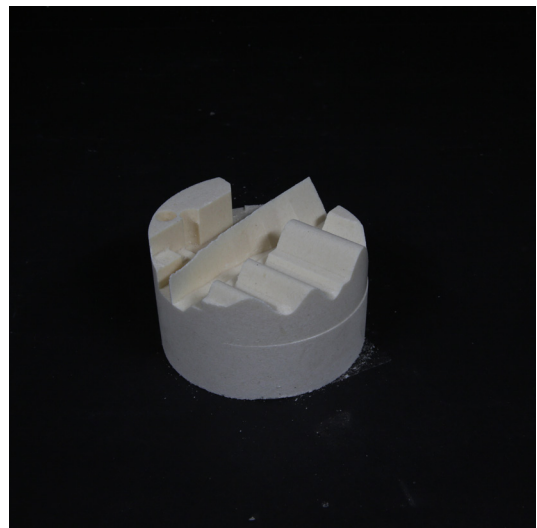
Fräsen T30 D3 #1



Fräsen T30 D3 #2



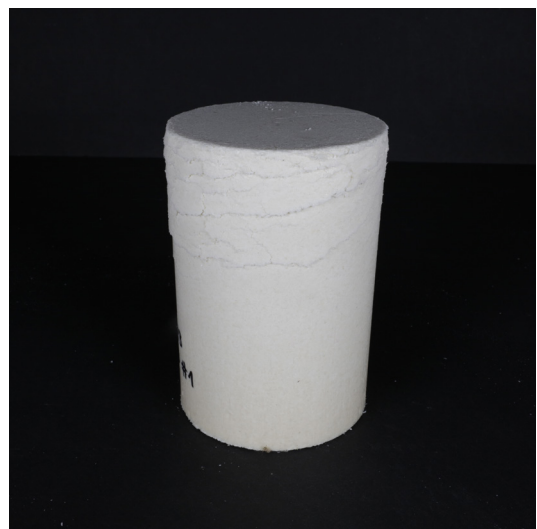
Fräsen T30 D3 #3



Fräsen T30 D3 #4



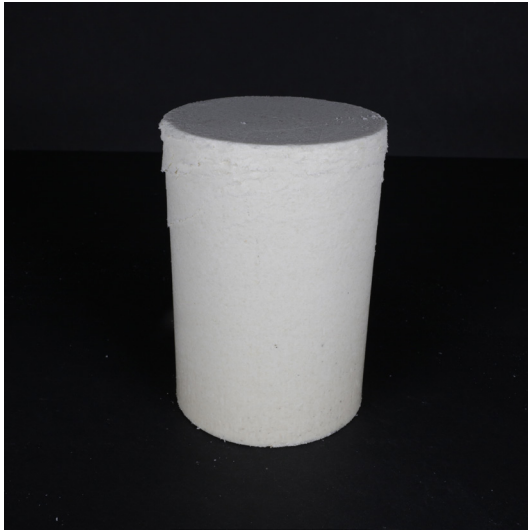
T30 D3 #1.1



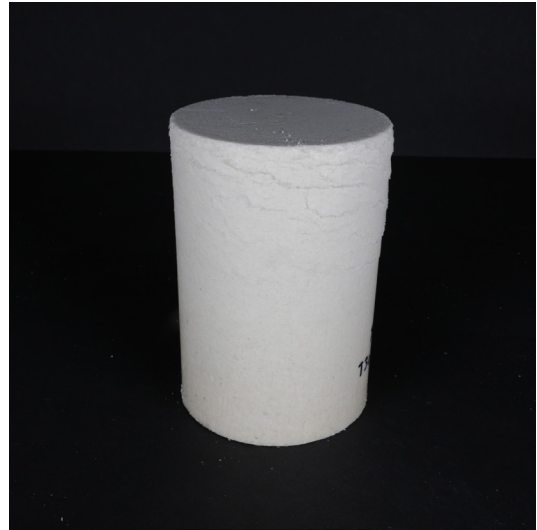
T30 D3 #1.2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

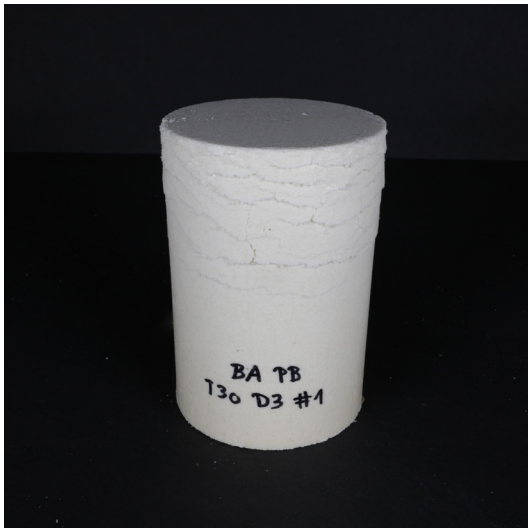
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T30 D3 #1.3



T30 D3 #1.4



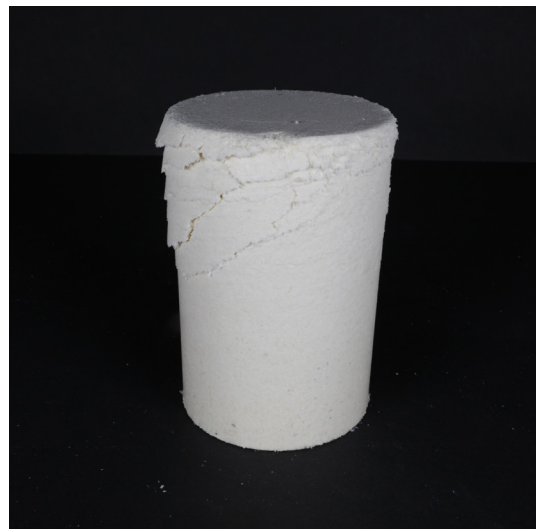
T30 D3 #1.5



T30 D3 #2.1



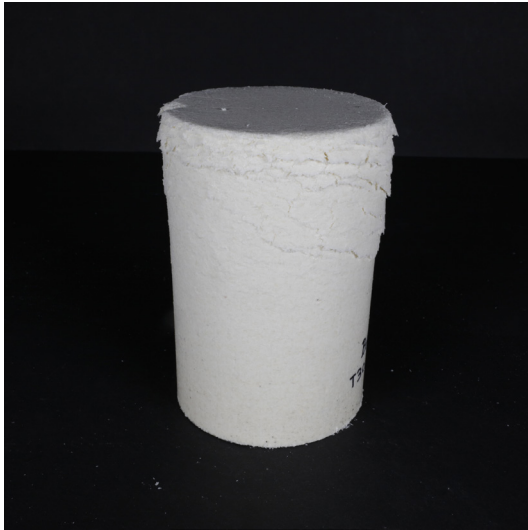
T30 D3 #2.2



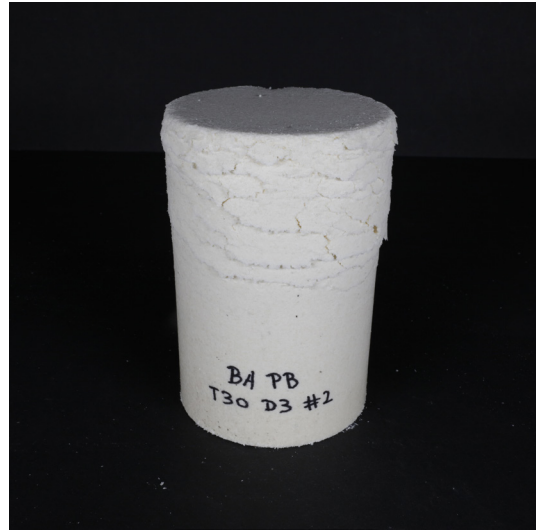
T30 D3 #2.3

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

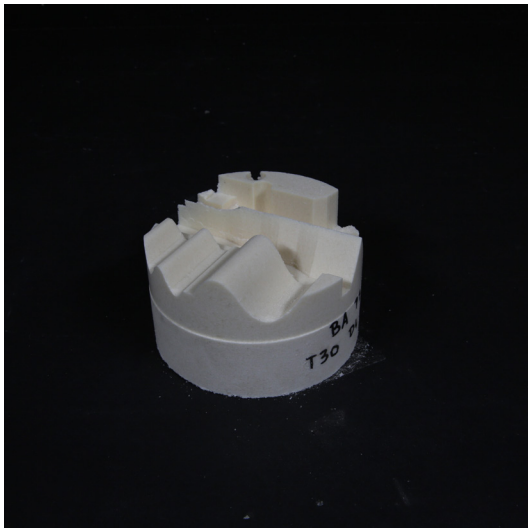
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



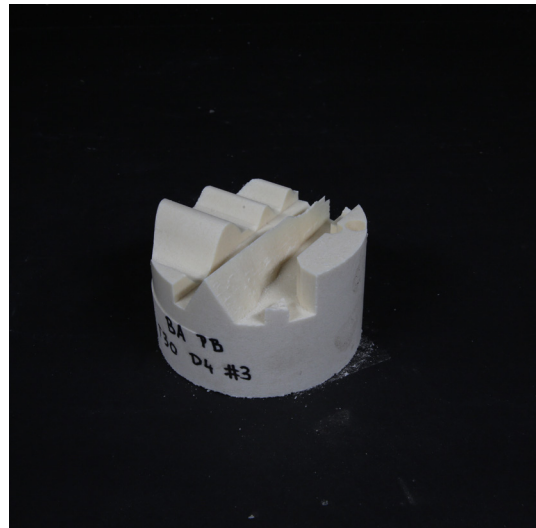
T30 D3 #2.4



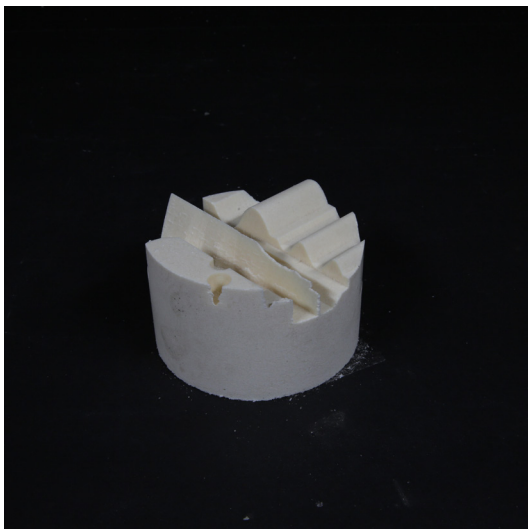
T30 D3 #2.5



Fräsen T30 D4 #1



Fräsen T30 D4 #2



Fräsen T30 D4 #3



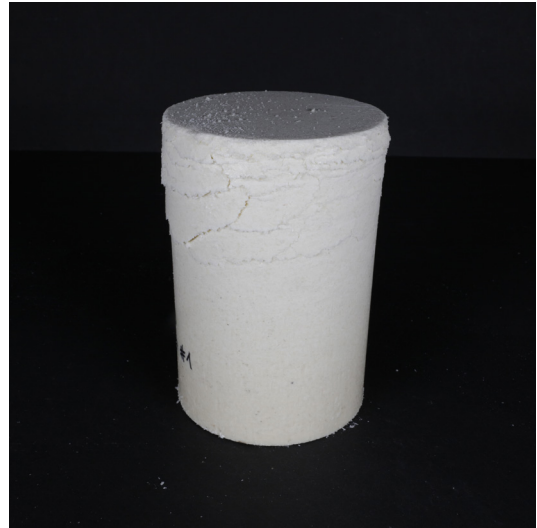
Fräsen T30 D4 #4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T30 D4 #1.1



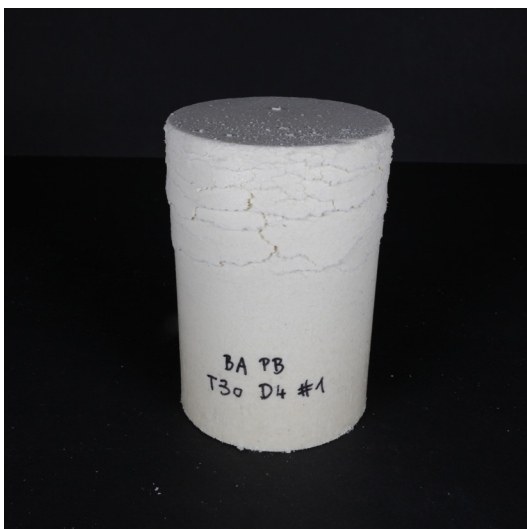
T30 D4 #1.2



T30 D4 #1.3



T30 D4 #1.4



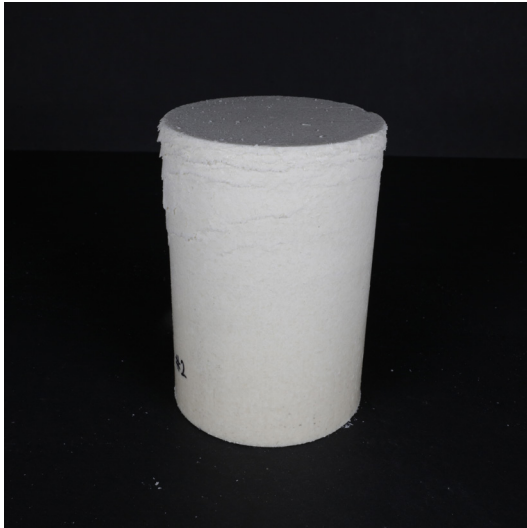
T30 D4 #1.5



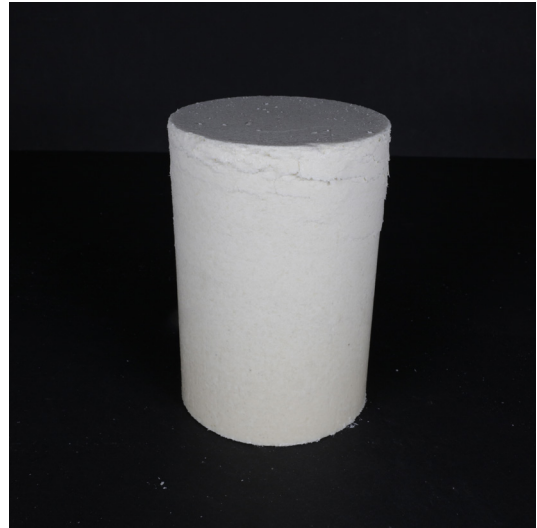
T30 D4 #2.1

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



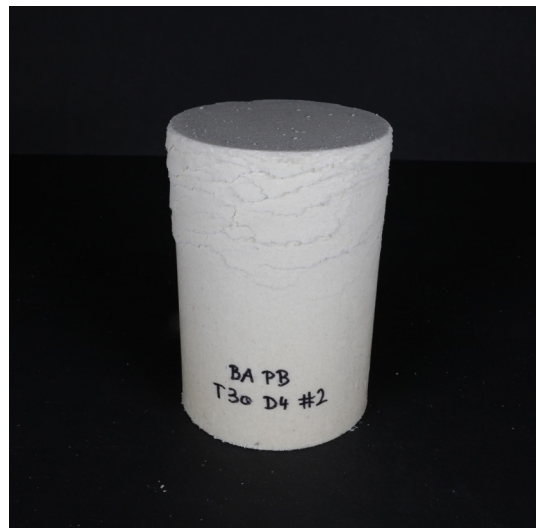
T30 D4 #2.2



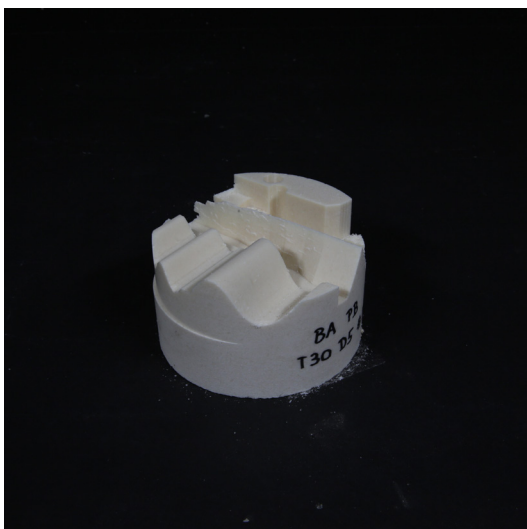
T30 D4 #2.3



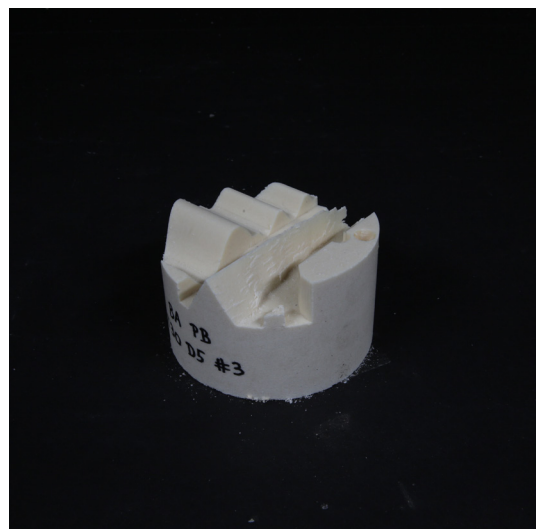
T30 D4 #2.4



T30 D4 #2.5



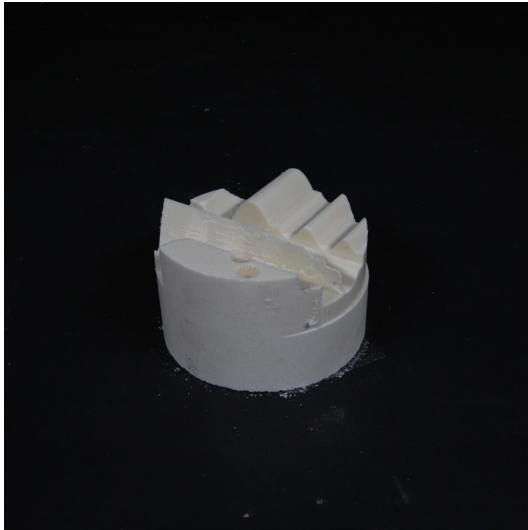
Fräsen T30 D5 #1



Fräsen T30 D5 #2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

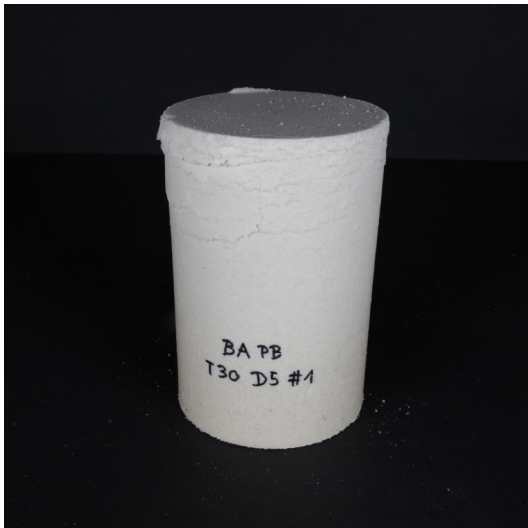
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



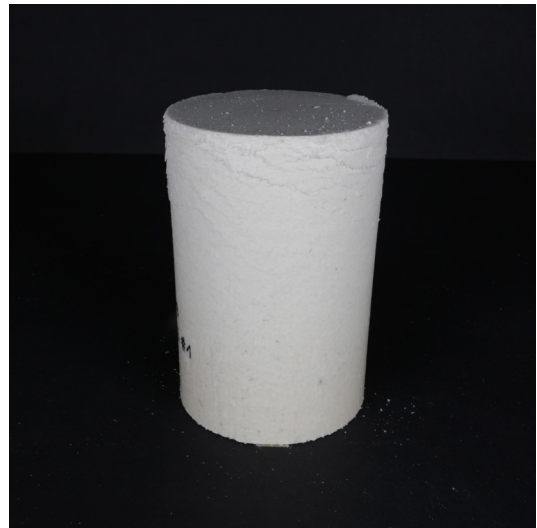
Fräsen T30 D5 #3



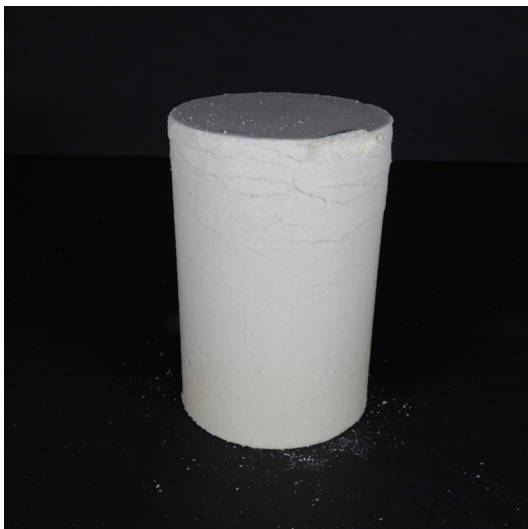
Fräsen T30 D5 #4



T30 D5 #1.1



T30 D5 #1.2



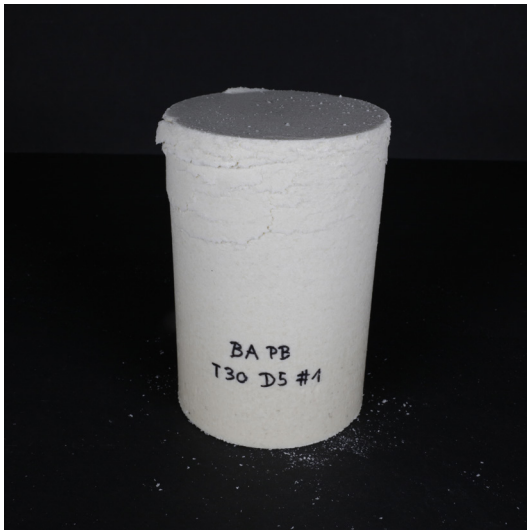
T30 D5 #1.3



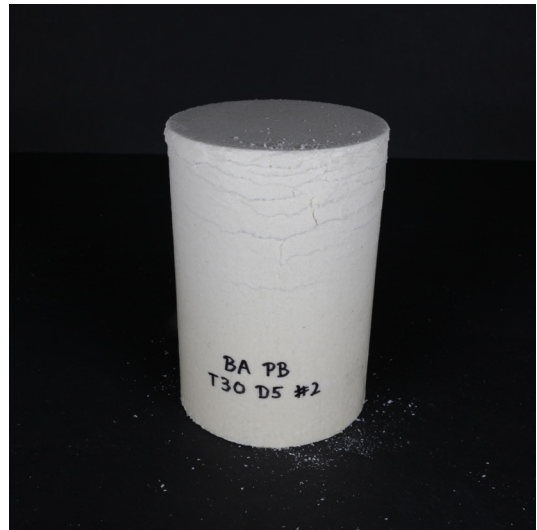
T30 D5 #1.4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T30 D5 #1.5



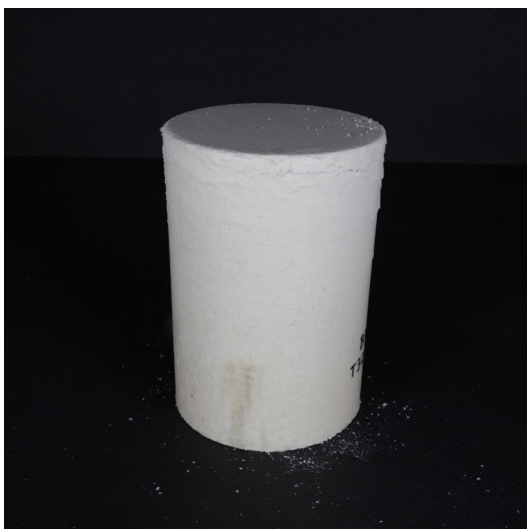
T30 D5 #2.1



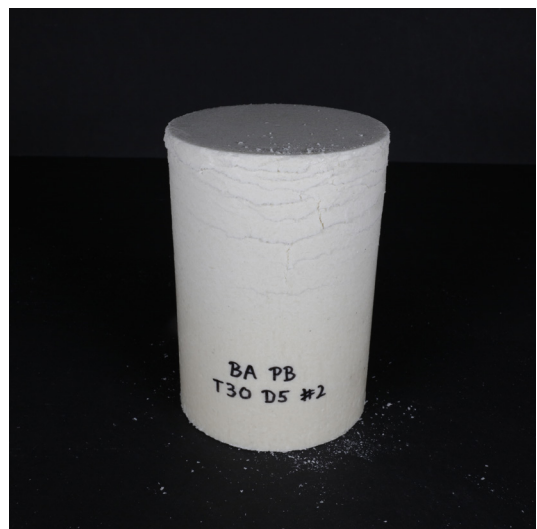
T30 D5 #2.2



T30 D5 #2.3



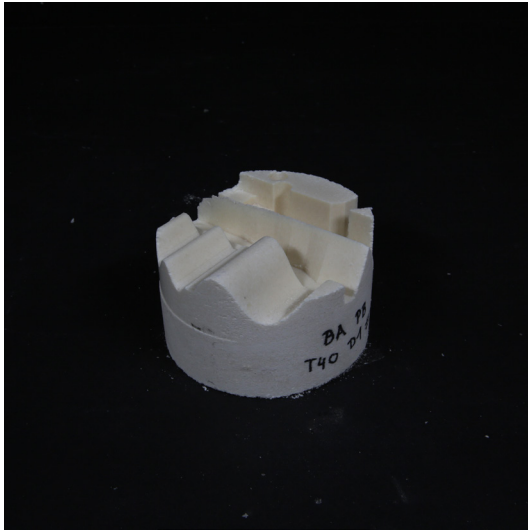
T30 D5 #2.4



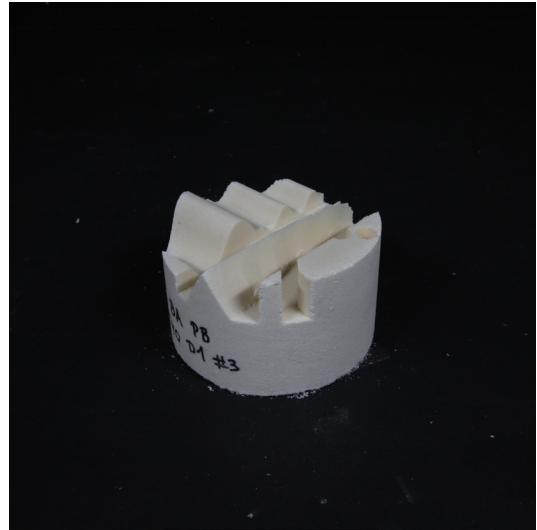
T30 D5 #2.5

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

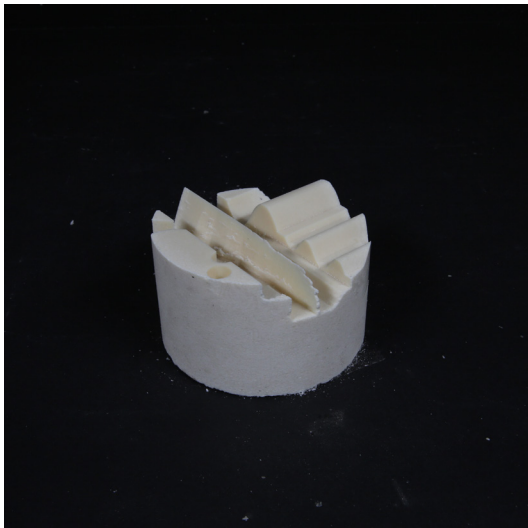
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



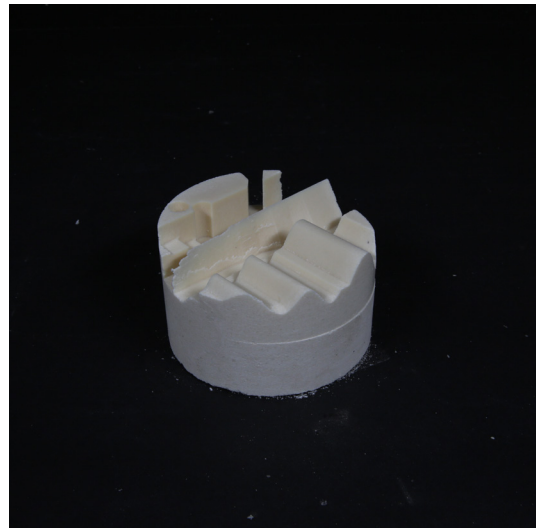
Fräsen T40 D1 #1



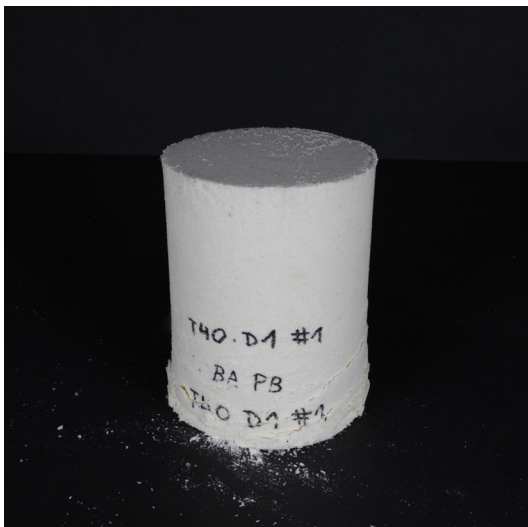
Fräsen T40 D1 #2



Fräsen T40 D1 #3



Fräsen T40 D1 #4



T40 D1 #1.1



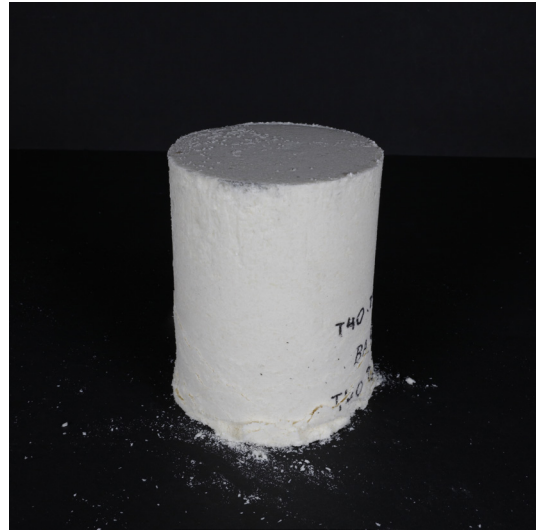
T40 D1 #1.2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

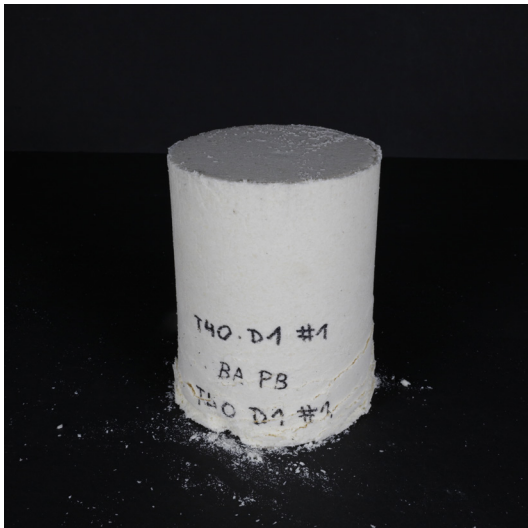
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



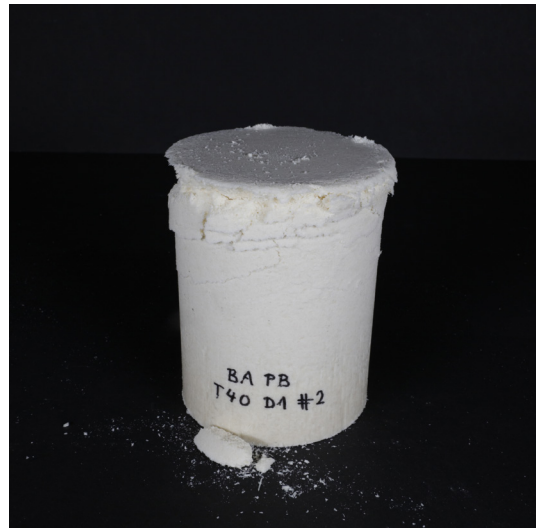
T40 D1 #1.3



T40 D1 #1.4



T40 D1 #1.5



T40 D1 #2.1



T40 D1 #2.2



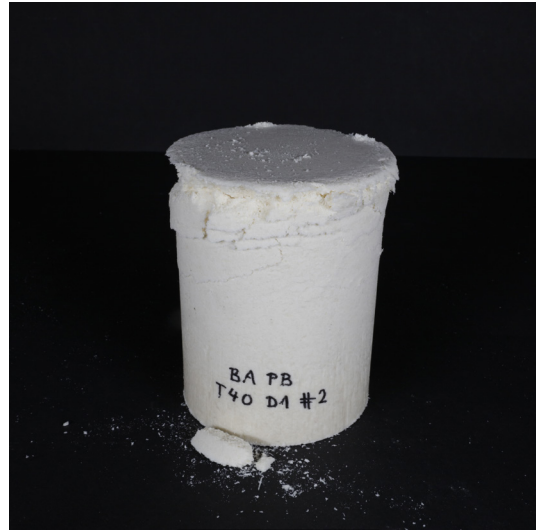
T40 D1 #2.3

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

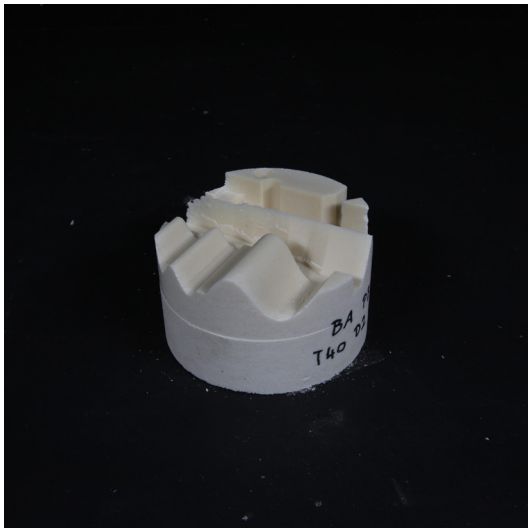
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



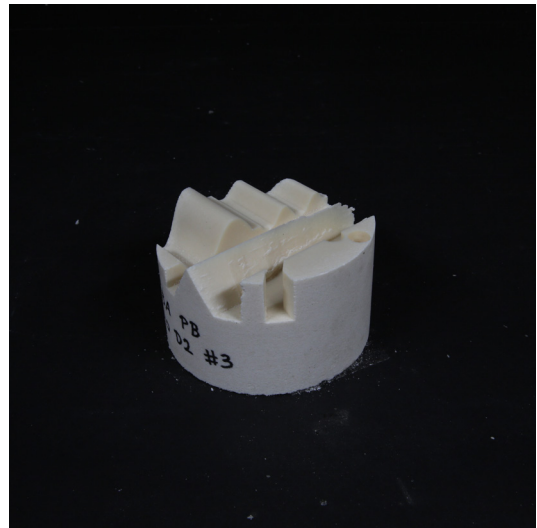
T40 D1 #2.4



T40 D1 #2.5



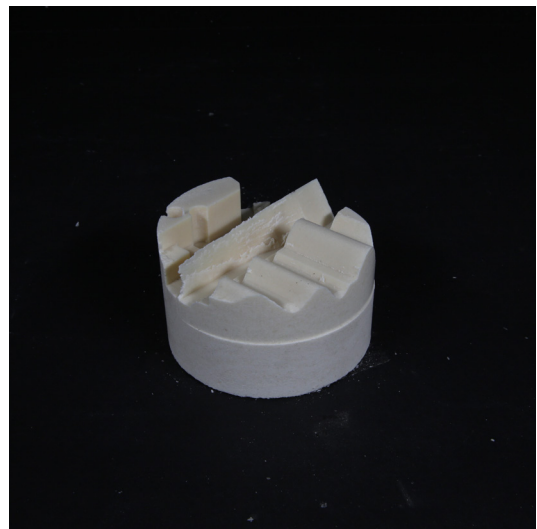
Fräsen T40 D2 #1



Fräsen T40 D2 #2



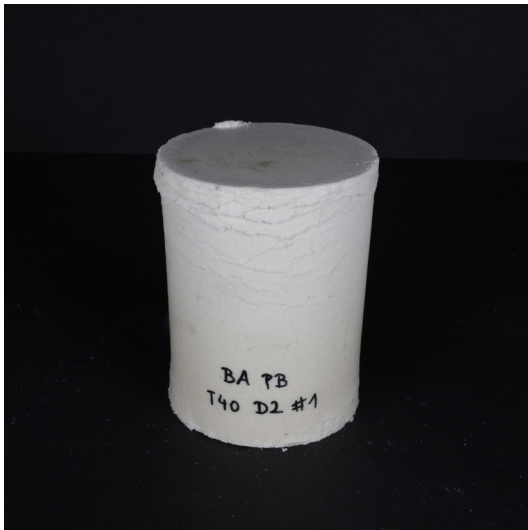
Fräsen T40 D2 #3



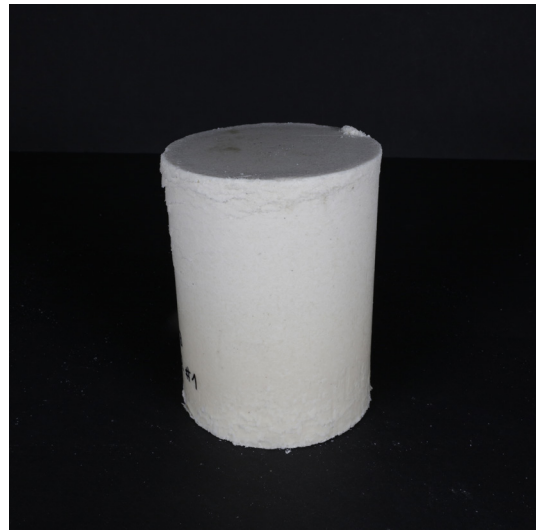
Fräsen T40 D2 #4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

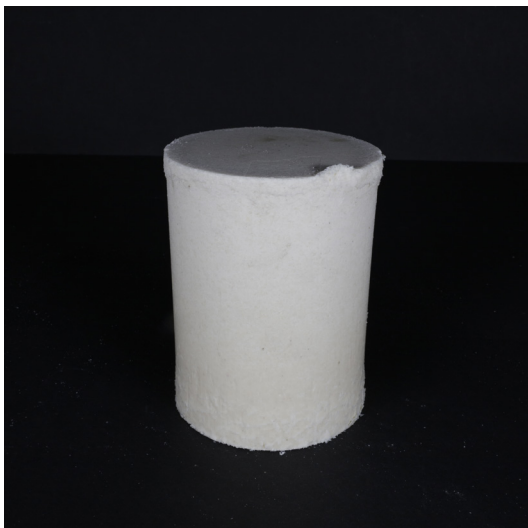
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



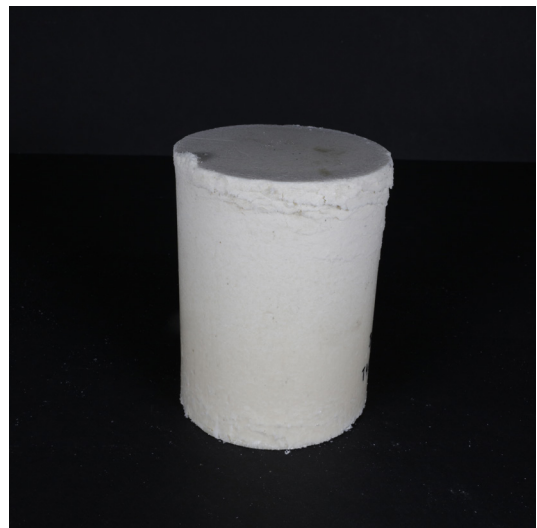
T40 D2 #1.1



T40 D2 #1.2



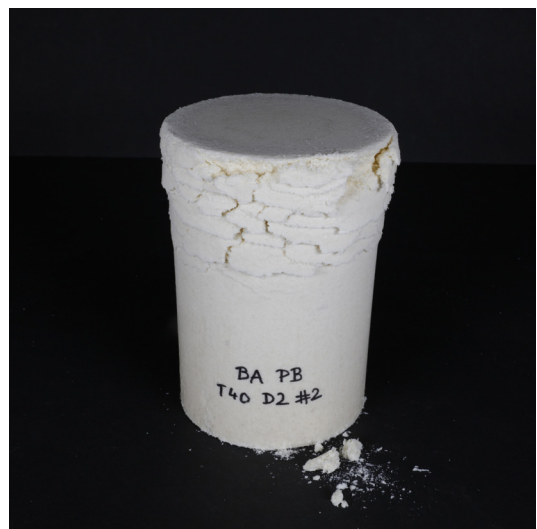
T40 D2 #1.3



T40 D2 #1.4



T40 D2 #1.5



T40 D2 #2.1

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



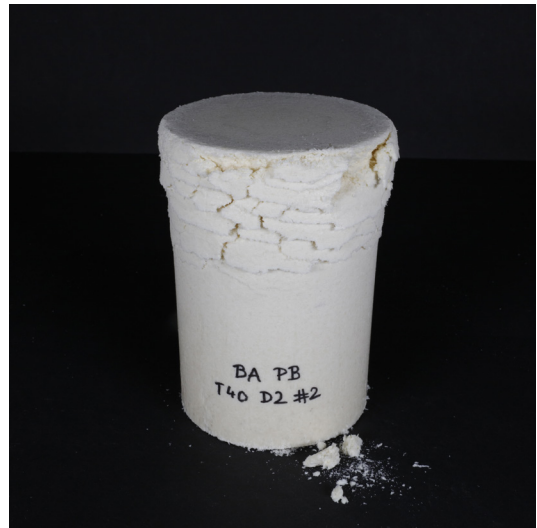
T40 D2 #2.2



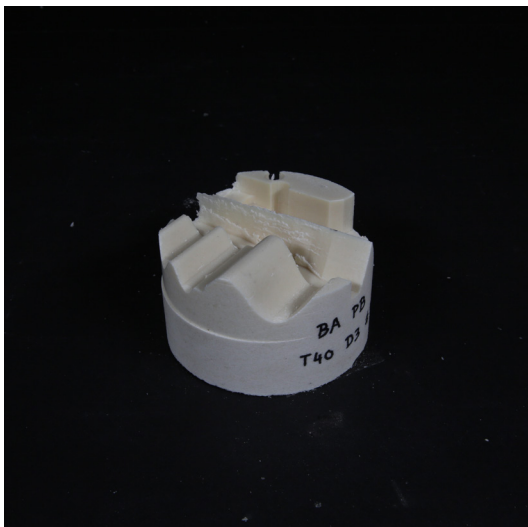
T40 D2 #2.3



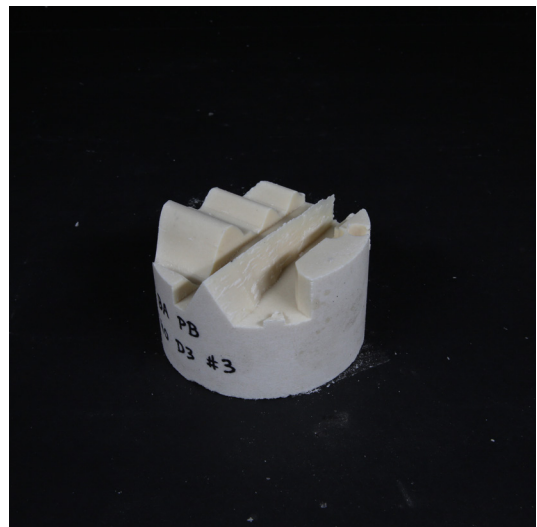
T40 D2 #2.4



T40 D2 #2.5



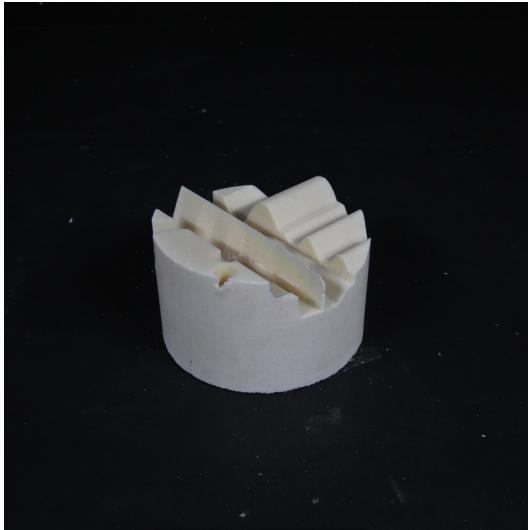
Fräsen T40 D3 #1



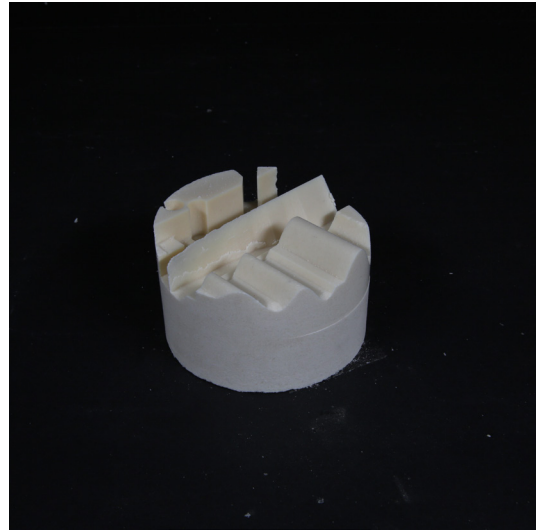
Fräsen T40 D3 #2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

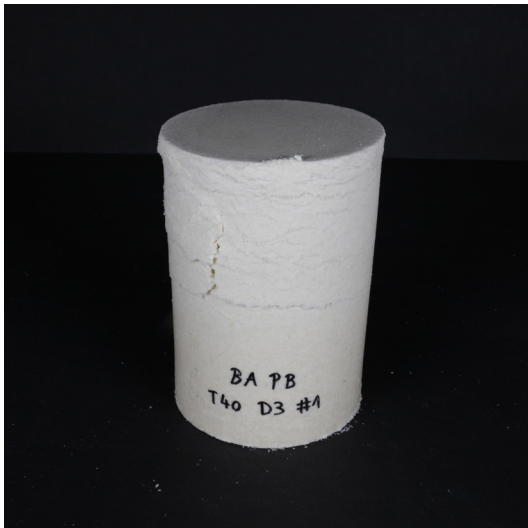
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



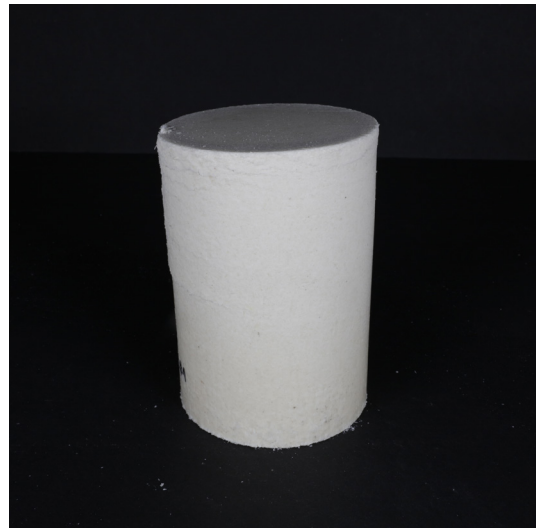
Fräsen T40 D3 #3



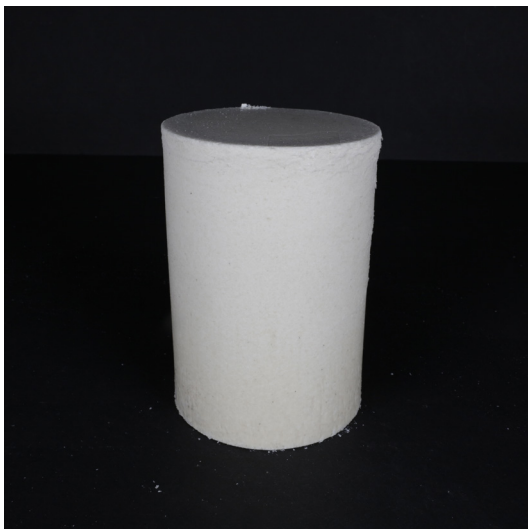
Fräsen T40 D3 #4



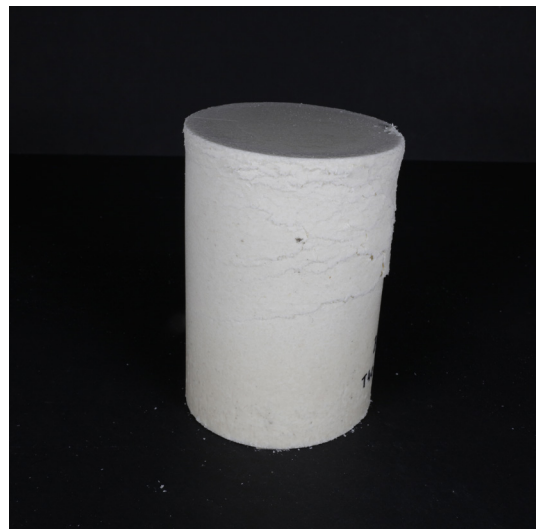
T40 D3 #1.1



T40 D3 #1.2



T40 D3 #1.3



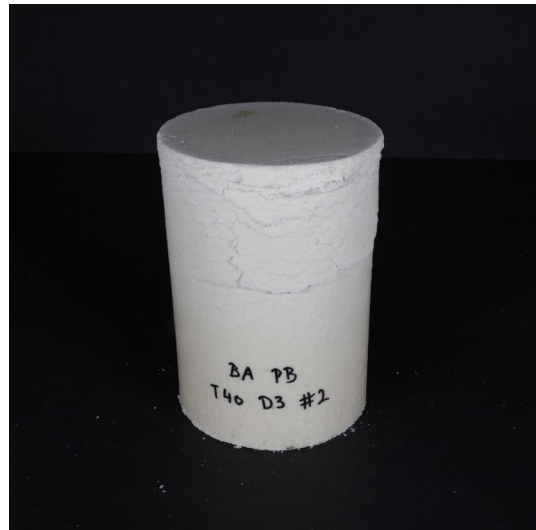
T40 D3 #1.4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

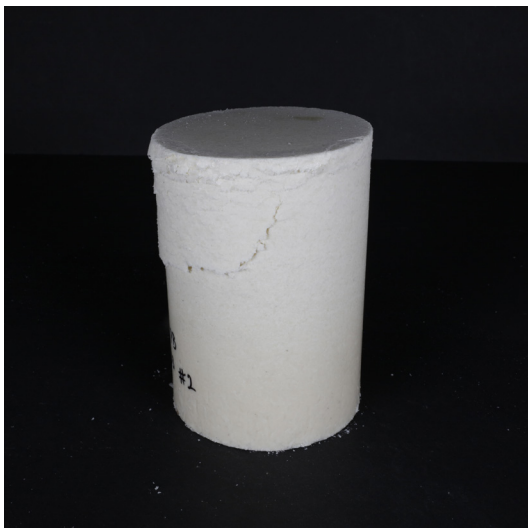
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



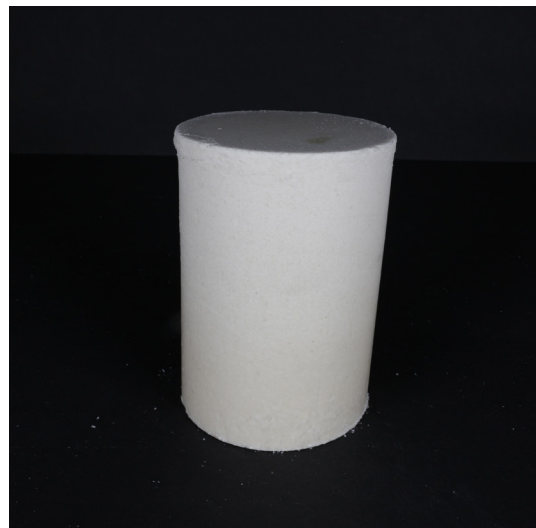
T40 D3 #1.5



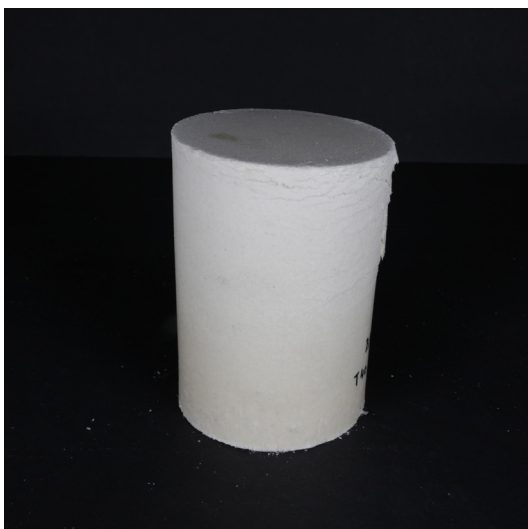
T40 D3 #2.1



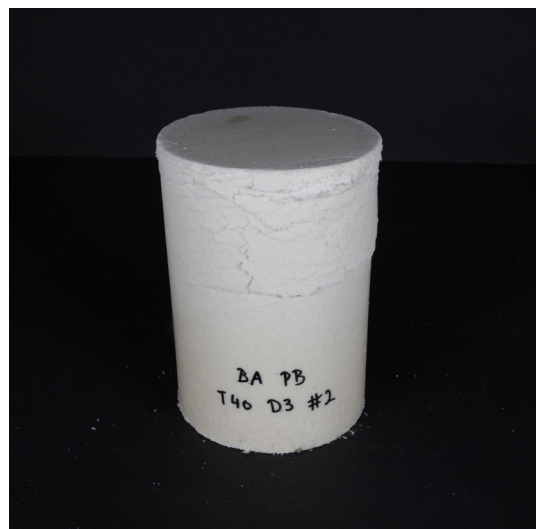
T40 D3 #2.2



T40 D3 #2.3



T40 D3 #2.4



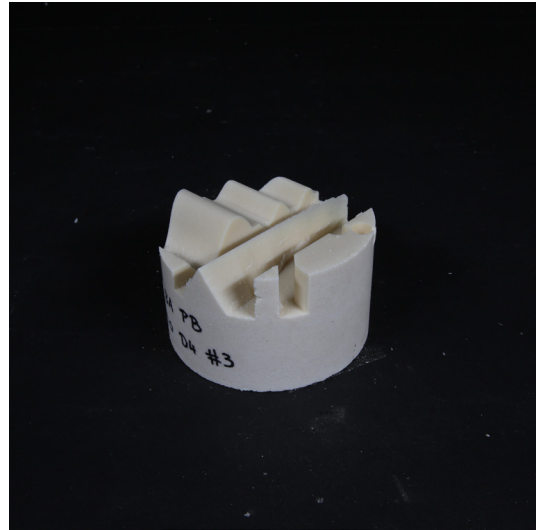
T40 D3 #2.5

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

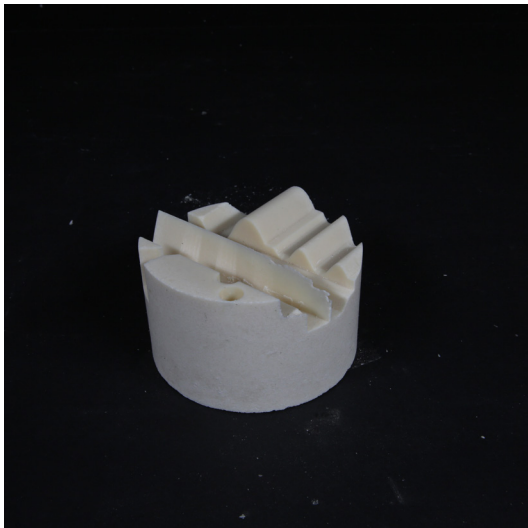
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



Fräsen T40 D4 #1



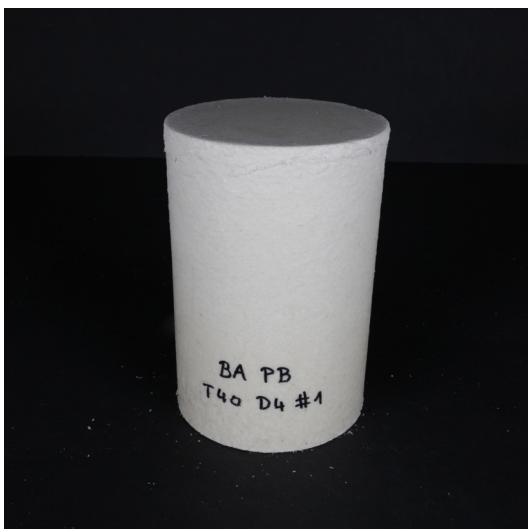
Fräsen T40 D4 #2



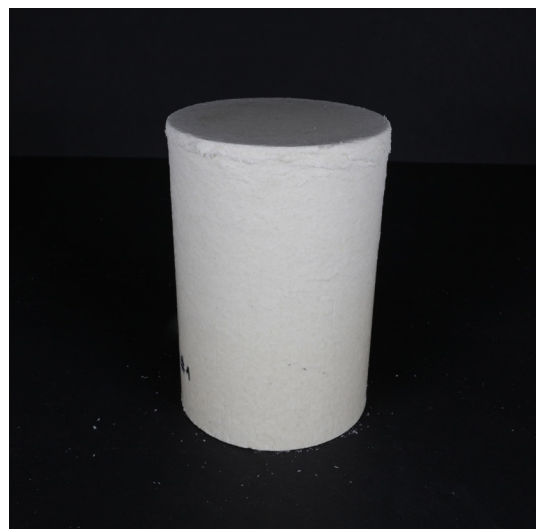
Fräsen T40 D4 #3



Fräsen T40 D4 #4



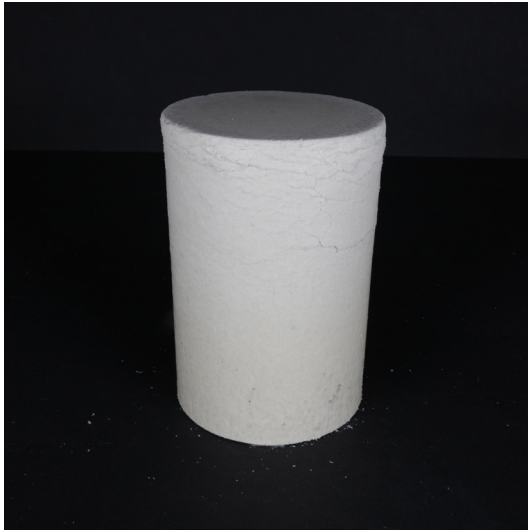
T40 D4 #1.1



T40 D4 #1.2

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

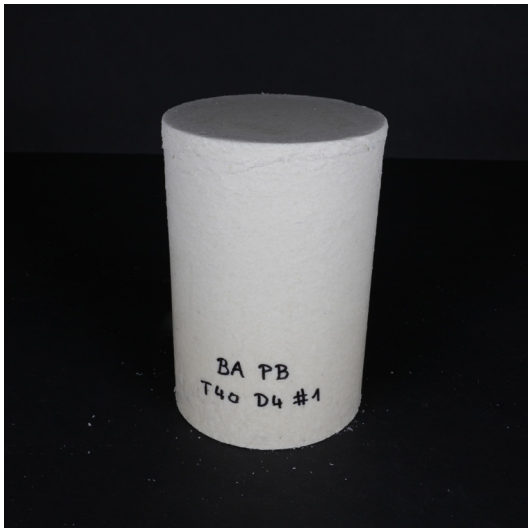
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



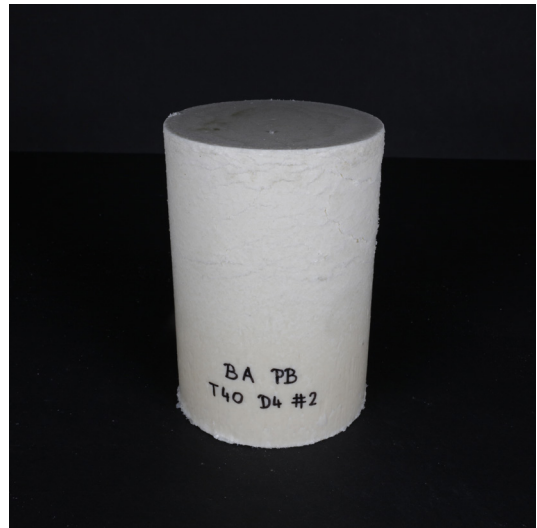
T40 D4 #1.3



T40 D4 #1.4



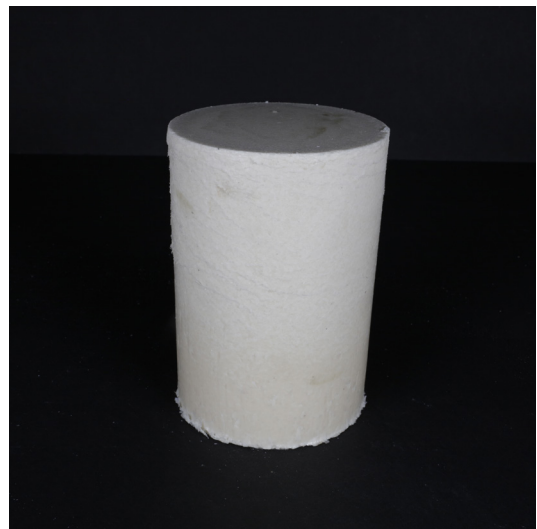
T40 D4 #1.5



T40 D4 #2.1



T40 D4 #2.2



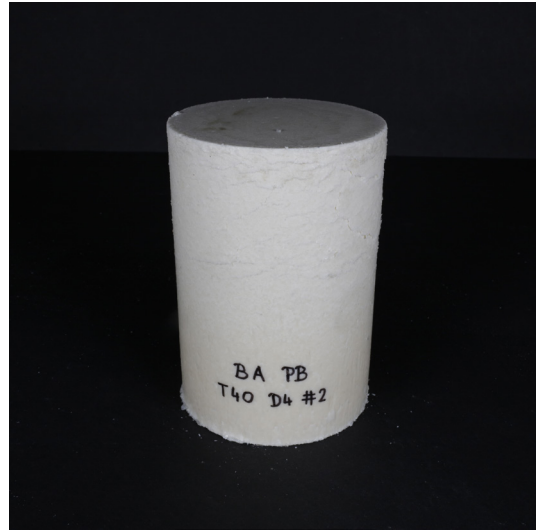
T40 D4 #2.3

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

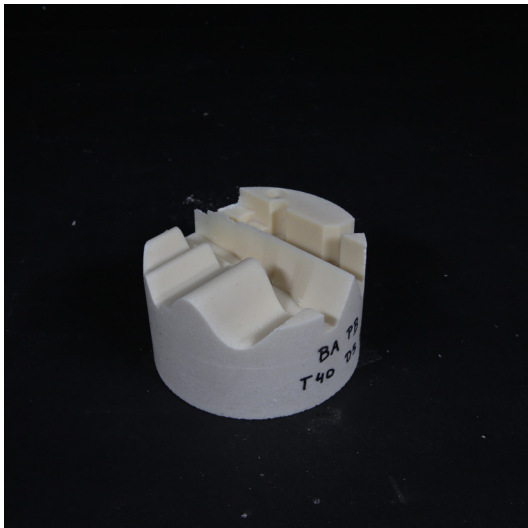
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



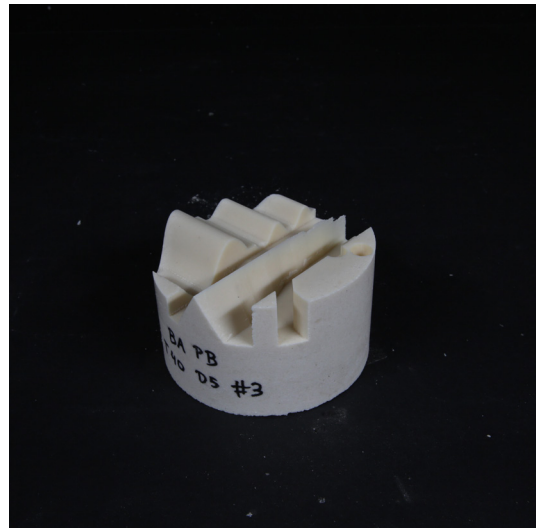
T40 D4 #2.4



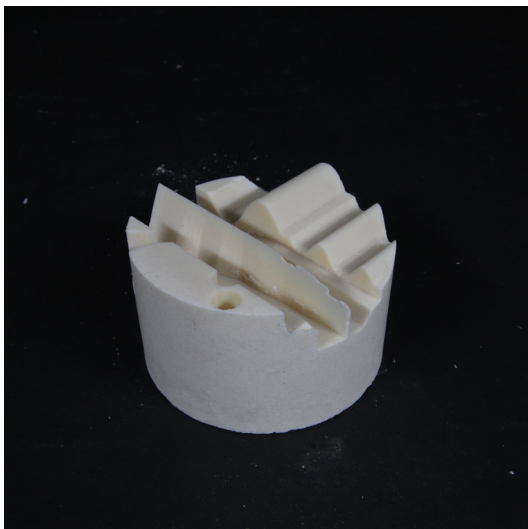
T40 D4 #2.5



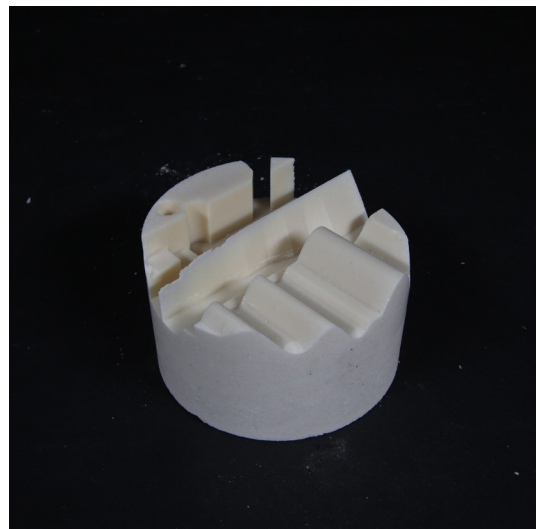
Fräsen T40 D5 #1



Fräsen T40 D5 #2



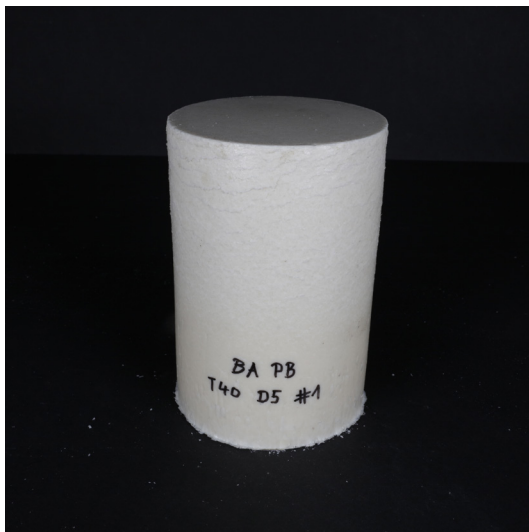
Fräsen T40 D5 #3



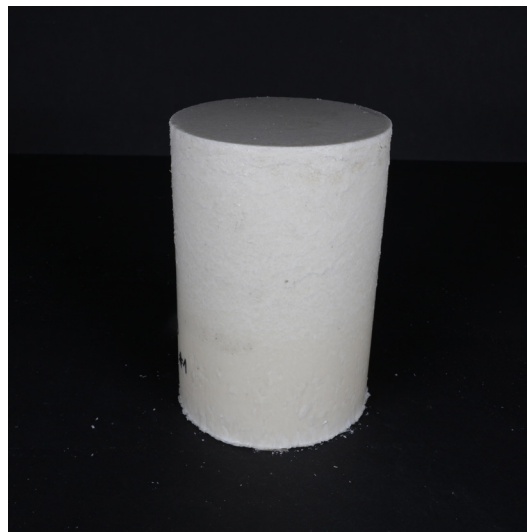
Fräsen T40 D5 #4

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

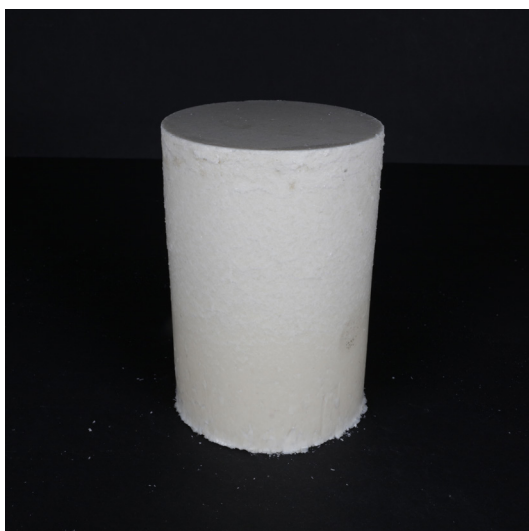
Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



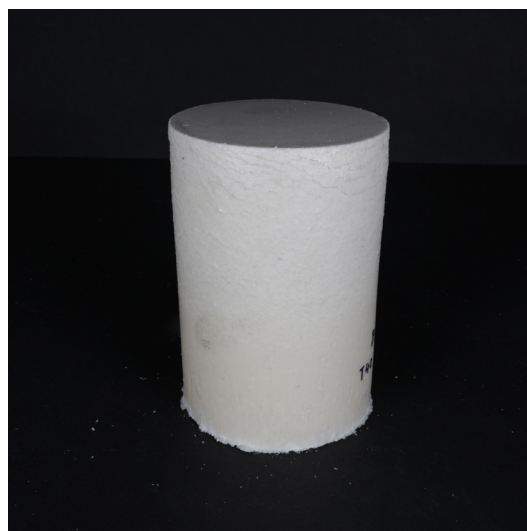
T40 D5 #1.1



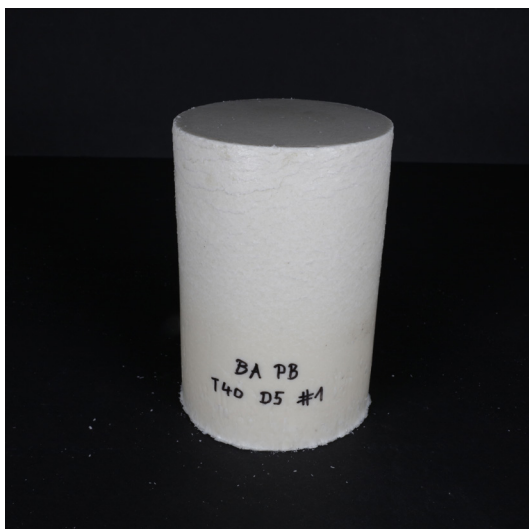
T40 D5 #1.2



T40 D5 #1.3



T40 D5 #1.4



T40 D5 #1.5



T40 D5 #2.1

Anhang C - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.1

Versuchsreihe 1: Temperaturbereich 10°C - 50°C, Presskraftbereich 10kN-50kN
Fotos der Prüfkörper



T40 D5 #2.2



T40 D5 #2.3



T40 D5 #2.4



T40 D5 #2.5

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T35 D4,5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		148	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8603	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,2892	0,0004	0,0045	0,0002
1	4111,4469	1,2174	0,5235	0,8226
2	11304,1155	2,3482	1,4393	1,5866
3	15781,2786	3,4790	2,0093	2,3507
4	18814,1563	4,6098	2,3955	3,1147
5	20942,3664	5,7406	2,6665	3,8788
6	22641,0813	6,9976	2,8828	4,7281
7	24639,0833	9,2223	3,1371	6,2313
8	26282,3108	12,3675	3,3464	8,3564
9	27699,6165	18,9564	3,5268	12,8084
10	26287,7848	16,0735	3,3471	10,8605

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
27901,3000	23,4757	3,5525	15,8620

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,9370

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T35 D4,5 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		148	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8603	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,5222	0,0003	0,0045	0,0002
1	5966,0585	1,2500	0,7596	0,8446
2	12923,8509	2,3828	1,6455	1,6100
3	17226,4847	3,5157	2,1933	2,3755
4	20111,4367	4,6486	2,5607	3,1409
5	22134,6912	5,7815	2,8183	3,9064
6	23918,4551	7,1878	3,0454	4,8566
7	25835,8081	9,5285	3,2895	6,4382
8	27468,0767	13,0236	3,4973	8,7997
9	28856,3748	19,9135	3,6741	13,4551
10	29005,3061	17,1429	3,6931	11,5830

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
29235,2177	29,9398	3,7223	20,2296

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0715

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T35 D4,5 #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		148	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8603	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,1968	0,0003	0,0046	0,0002
1	5131,0826	1,1436	0,6533	0,7727
2	11800,5529	2,2705	1,5025	1,5341
3	15882,2135	3,3974	2,0222	2,2955
4	18661,2952	4,5243	2,3760	3,0569
5	20628,4170	5,6511	2,6265	3,8183
6	22451,3721	7,1237	2,8586	4,8133
7	24327,7183	9,4451	3,0975	6,3818
8	25954,9105	12,9213	3,3047	8,7306
9	27363,3451	19,7003	3,4840	13,3110
10	27454,4395	17,1429	3,4956	11,5830

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
27679,2235	28,5490	3,5242	19,2898

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,8922

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T35 D5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		150	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8488	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,5170	0,0004	0,0048	0,0003
1	5042,0447	1,2253	0,6420	0,8169
2	11784,2097	2,3846	1,5004	1,5897
3	15972,6701	3,5440	2,0337	2,3626
4	18843,7374	4,7033	2,3993	3,1355
5	20889,5663	5,8626	2,6597	3,9084
6	22717,9444	7,3005	2,8925	4,8670
7	24700,4851	9,6554	3,1450	6,4369
8	26379,8297	13,0504	3,3588	8,7003
9	27848,0043	19,7105	3,5457	13,1403
10	26457,0345	16,6600	3,3686	11,1067

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
28044,8643	22,6711	3,5708	15,1141

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,9162

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T35 D5 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		150	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8488	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	52,7067	0,0003	0,0067	0,0002
1	4374,9432	1,1712	0,5570	0,7808
2	11602,1981	2,2828	1,4772	1,5219
3	16137,8079	3,3944	2,0547	2,2630
4	19215,9100	4,5061	2,4466	3,0040
5	21385,0156	5,6177	2,7228	3,7451
6	23046,3337	6,7918	2,9344	4,5279
7	25031,9399	8,8611	3,1872	5,9074
8	26673,6815	11,6732	3,3962	7,7822
9	28167,8910	17,0566	3,5864	11,3711
10	27066,1513	15,8238	3,4462	10,5492

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
28630,5325	24,0773	3,6454	16,0515

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0325

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T35 D5 #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		150	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8488	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	55,2972	0,0002	0,0070	0,0002
1	3628,3474	1,1095	0,4620	0,7397
2	10132,3725	2,1731	1,2901	1,4487
3	14240,9670	3,2366	1,8132	2,1577
4	17060,7500	4,3002	2,1722	2,8668
5	19088,7979	5,3638	2,4305	3,5758
6	20675,4155	6,4751	2,6325	4,3168
7	22588,6685	8,3785	2,8761	5,5857
8	24181,0913	10,8323	3,0788	7,2215
9	25674,9802	14,9281	3,2690	9,9521
10	24956,0894	13,8105	3,1775	9,2070

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
26378,0477	21,0405	3,3586	14,0270

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,7742

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T35 D5,5 #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		147	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8661	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,6025	0,0004	0,0044	0,0003
1	3806,8668	1,4343	0,4847	0,9757
2	11320,0237	2,6422	1,4413	1,7974
3	16040,1575	3,8502	2,0423	2,6192
4	19182,7539	5,0581	2,4424	3,4409
5	21382,3943	6,2661	2,7225	4,2627
6	23243,9357	7,7003	2,9595	5,2383
7	25317,9441	10,1215	3,2236	6,8854
8	27077,7340	13,6154	3,4476	9,2622
9	28682,4452	19,8070	3,6520	13,4742
10	29282,6669	17,1428	3,7284	11,6618

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
29404,9028	29,7529	3,7439	20,2401

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,9068

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T35 D5,5 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		147	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8661	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	54,8719	0,0004	0,0070	0,0003
1	4521,3245	1,3091	0,5757	0,8905
2	12584,9842	2,5217	1,6024	1,7154
3	17378,6295	3,7343	2,2127	2,5404
4	20531,9612	4,9470	2,6142	3,3653
5	22712,5023	6,1596	2,8918	4,1902
6	24639,3008	7,6851	3,1372	5,2280
7	26693,3930	10,1696	3,3987	6,9181
8	28452,7849	13,8397	3,6227	9,4148
9	30036,3842	20,4364	3,8244	13,9023
10	30938,8259	18,0000	3,9393	12,2449

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31059,7048	29,9787	3,9546	20,3937

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0896

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T35 D5,5 #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		147	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8661	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,6922	0,0004	0,0044	0,0002
1	7005,4804	1,2278	0,8920	0,8353
2	14030,0191	2,4222	1,7864	1,6477
3	18388,2517	3,6165	2,3413	2,4602
4	21313,1090	4,8109	2,7137	3,2727
5	23378,8993	6,0053	2,9767	4,0852
6	25315,6941	7,5963	3,2233	5,1676
7	27302,4279	10,0937	3,4763	6,8665
8	29030,8452	13,7734	3,6963	9,3696
9	30582,0413	20,2387	3,8938	13,7678
10	31293,9396	17,1428	3,9845	11,6618

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31405,5496	29,8657	3,9987	20,3168

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1889

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D4,5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		154	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8268	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,4993	0,0003	0,0041	0,0002
1	4822,3744	1,1743	0,6140	0,7625
2	12687,0137	2,3098	1,6154	1,4999
3	17688,4546	3,4454	2,2522	2,2373
4	21042,6171	4,5809	2,6792	2,9746
5	23329,4287	5,7165	2,9704	3,7120
6	25070,0599	6,9618	3,1920	4,5206
7	27018,1779	9,1766	3,4401	5,9588
8	28636,6834	13,1461	3,6461	8,5364
9	26575,5659	19,6609	3,3837	12,7668
10	22954,8059	19,6609	2,9227	12,7668

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
29039,2031	16,4154	3,6974	10,6593

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,2899

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D4,5 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		151	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8432	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	2193,8847	1,7674	0,2793	1,1704
1	6917,7199	1,0742	0,8808	0,7114
2	14935,1047	2,1256	1,9016	1,4077
3	20110,3683	3,1771	2,5605	2,1040
4	23623,8678	4,2286	3,0079	2,8004
5	26038,8536	5,2801	3,3154	3,4967
6	27781,5616	6,3426	3,5373	4,2004
7	29567,9014	7,9369	3,7647	5,2562
8	31185,9488	10,3681	3,9707	6,8663
9	32494,7505	15,8106	4,1374	10,4706
10	29980,5251	22,9729	3,8172	15,2138

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
32587,9111	19,8044	4,1492	13,1155

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,7160

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D4,5 #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		151	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8432	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	2244,7724	1,8672	0,2858	1,2366
1	5791,5386	1,1479	0,7374	0,7602
2	14300,1494	2,2096	1,8208	1,4633
3	19699,5143	3,2712	2,5082	2,1664
4	23299,4373	4,3328	2,9666	2,8694
5	25743,7102	5,3945	3,2778	3,5725
6	27493,8106	6,4678	3,5006	4,2833
7	29306,3986	8,1070	3,7314	5,3689
8	30947,1712	10,6022	3,9403	7,0213
9	32325,5949	15,9126	4,1158	10,5381
10	30927,7767	24,2704	3,9378	16,0731

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
32507,3065	20,2946	4,1390	13,4401

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,6641

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 #4		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		156	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8162	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	45,8251	0,0002	0,0058	0,0001
1	2830,7278	1,0234	0,3604	0,6561
2	9890,2917	2,0555	1,2593	1,3176
3	14805,0612	3,0875	1,8850	1,9792
4	18196,3152	4,1196	2,3168	2,6407
5	20622,2058	5,1516	2,6257	3,3023
6	22392,5294	6,1836	2,8511	3,9638
7	24026,7861	7,4961	3,0592	4,8052
8	25748,2457	9,6429	3,2784	6,1813
9	27226,8144	13,1835	3,4666	8,4510
10	25410,0682	19,1705	3,2353	12,2888

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
27757,2052	17,2077	3,5342	11,0306

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0977

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T40 D5 #5	Höhe [mm] 152	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	Ergebnisse:	1000	0,8377	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,7591	0,0003	0,0046	0,0002
1	8996,8876	1,1374	1,1455	0,7483
2	17399,9706	2,2961	2,2154	1,5106
3	22667,1408	3,4549	2,8861	2,2729
4	26069,7834	4,6136	3,3193	3,0353
5	28353,1195	5,7724	3,6100	3,7976
6	30161,7703	7,1258	3,8403	4,6880
7	32102,3799	9,5240	4,0874	6,2658
8	33737,5217	13,8539	4,2956	9,1144
9	34485,1911	23,3218	4,3908	15,3433
10	30931,1670	16,8880	3,9383	11,1105

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
34566,7633	27,9497	4,4012	18,3880

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,9013

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 #6		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		153	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8322	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	39,0346	0,0003	0,0050	0,0002
1	5776,3621	1,2560	0,7355	0,8209
2	13429,9842	2,4434	1,7100	1,5970
3	17464,8764	3,6308	2,2237	2,3731
4	20022,2312	4,8183	2,5493	3,1492
5	21996,7129	6,2665	2,8007	4,0958
6	24160,6687	8,7965	3,0762	5,7493
7	26740,7743	9,9839	3,4047	6,5254
8	28725,8988	11,7590	3,6575	7,6856
9	30482,3574	14,9861	3,8811	9,7948
10	29615,0386	22,6730	3,7707	14,8190

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31262,9361	20,2110	3,9805	13,2098

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,9438

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: Probekörper war nicht grade, Höhe variierte zwischen 142-149mm

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		154	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8268	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0002	0,0002	0,0000	0,0001
1	7490,0759	1,0491	0,9537	0,6812
2	15127,1846	2,0843	1,9261	1,3534
3	20070,5616	3,1195	2,5555	2,0256
4	23421,8129	4,1547	2,9822	2,6978
5	25785,0539	5,1899	3,2831	3,3701
6	27482,4940	6,2301	3,4992	4,0455
7	29236,9837	7,7522	3,7226	5,0339
8	30887,1949	10,0234	3,9327	6,5087
9	32329,7327	14,1005	4,1163	9,1562
10	30658,5894	21,1525	3,9036	13,7354

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
32738,1460	18,7392	4,1684	12,1683

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,7153

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		154	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8268	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0002	0,0002	0,0000	0,0001
1	8061,7144	1,1252	1,0264	0,7306
2	16033,1614	2,2347	2,0414	1,4511
3	20964,2688	3,3442	2,6693	2,1716
4	24213,1548	4,4538	3,0829	2,8920
5	26426,9322	5,5633	3,3648	3,6125
6	28139,6423	6,7830	3,5829	4,4045
7	30057,8527	8,8782	3,8271	5,7651
8	31685,2332	12,2276	4,0343	7,9400
9	32696,0885	20,1147	4,1630	13,0615
10	27739,6405	18,4615	3,5319	11,9880

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
32895,8837	28,6346	4,1884	18,5939

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,7048

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		154	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8268	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	0,0002	0,0002	0,0000	0,0001
1	7647,3264	1,1227	0,9737	0,7290
2	15408,8699	2,2745	1,9619	1,4770
3	20574,2209	3,4264	2,6196	2,2249
4	23849,7136	4,5781	3,0366	2,9728
5	26038,2345	5,7300	3,3153	3,7208
6	27808,3439	7,0670	3,5407	4,5890
7	29776,5099	9,3693	3,7913	6,0840
8	31437,6445	12,9714	4,0028	8,4230
9	32732,9902	20,4637	4,1677	13,2881
10	33309,4231	17,1429	4,2411	11,1317

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
33476,5145	29,9199	4,2624	19,4285

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,6222

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T45 D4,5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		134	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9502	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,5857	0,0003	0,0049	0,0002
1	6807,2791	1,1095	0,8667	0,8280
2	13912,5412	2,2360	1,7714	1,6687
3	18483,3669	3,3626	2,3534	2,5094
4	21366,9397	4,4891	2,7205	3,3501
5	23325,5890	5,6165	2,9699	4,1914
6	25184,0674	7,1719	3,2065	5,3522
7	27007,4848	9,5578	3,4387	7,1327
8	28614,3356	13,3690	3,6433	9,9768
9	29926,1595	20,8466	3,8103	15,5571
10	30606,8824	17,1429	3,8970	12,7932

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
30838,5671	29,9405	3,9265	22,3437

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1438

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T45 D4,5 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		134	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9502	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,8910	0,0003	0,0044	0,0002
1	7120,1254	1,2103	0,9066	0,9032
2	14420,1365	2,3650	1,8360	1,7649
3	18801,3098	3,5197	2,3939	2,6267
4	21609,8493	4,6745	2,7515	3,4884
5	23554,5825	5,8300	2,9991	4,3508
6	25477,5418	7,4750	3,2439	5,5784
7	27339,2993	9,9328	3,4809	7,4126
8	28987,7065	13,7657	3,6908	10,2729
9	30412,6430	20,8804	3,8723	15,5824
10	31348,8321	17,1428	3,9915	12,7931

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31446,4313	29,9734	4,0039	22,3682

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1390

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T45 D4,5 #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		134	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9502	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,2252	0,0003	0,0047	0,0003
1	6169,5521	1,2131	0,7855	0,9053
2	13594,2804	2,4024	1,7309	1,7928
3	18250,2623	3,5917	2,3237	2,6804
4	21211,8476	4,7809	2,7008	3,5679
5	23259,7624	5,9710	2,9615	4,4560
6	25192,4669	7,5707	3,2076	5,6498
7	27148,5144	10,0380	3,4567	7,4911
8	28861,7434	13,7736	3,6748	10,2788
9	30370,7254	20,7239	3,8669	15,4656
10	31251,8122	17,1429	3,9791	12,7932

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31478,2093	29,9275	4,0079	22,3339

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0829

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T45 D5 #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		133	100	7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
Ergebnisse:		1000	0,9573	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,3796	0,0002	0,0051	0,0001
1	8271,6518	1,1015	1,0532	0,8282
2	15011,8106	2,2367	1,9114	1,6817
3	18962,9681	3,3718	2,4144	2,5352
4	21459,6041	4,5069	2,7323	3,3887
5	23233,0355	5,6584	2,9581	4,2544
6	25237,7264	7,5433	3,2134	5,6717
7	26994,9212	10,0685	3,4371	7,5703
8	28614,4244	14,0760	3,6433	10,5834
9	30016,6286	21,1665	3,8218	15,9146
10	30940,8727	17,1429	3,9395	12,8894

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31074,9764	29,9144	3,9566	22,4920

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1032

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

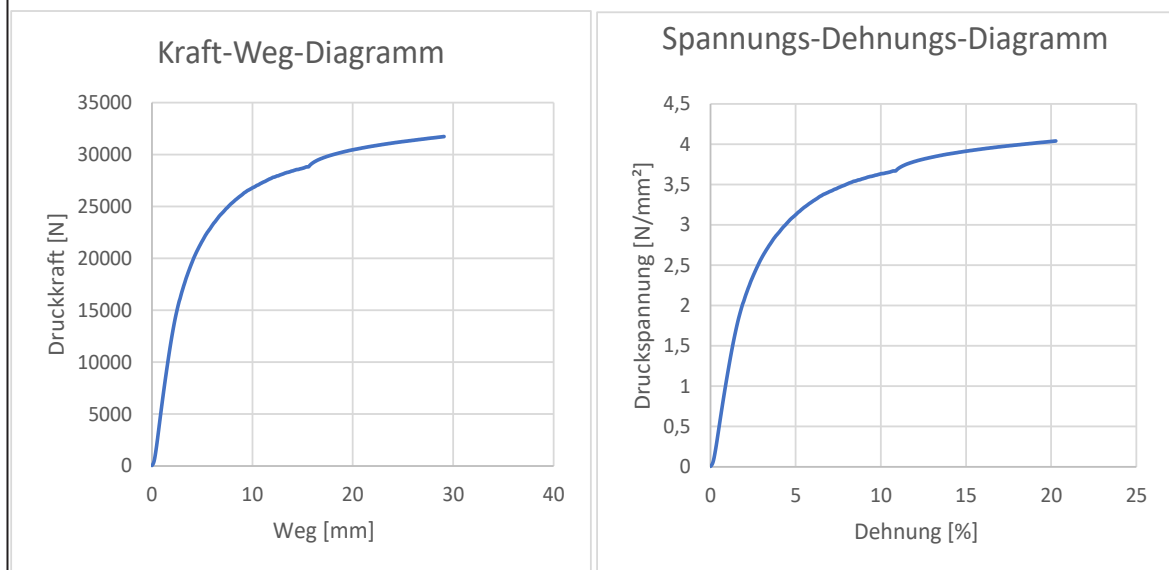
Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T45 D5 #2	Höhe [mm] 143,5	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
	Masse [g] 1000	Rohdichte [g/cm ³] 0,8873	
Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,3641	0,0004	0,0063	0,0003
1	7537,5787	1,2140	0,9597	0,8460
2	14711,1711	2,4260	1,8731	1,6906
3	18723,6705	3,6381	2,3840	2,5353
4	21388,9582	4,8501	2,7233	3,3799
5	23307,4212	6,0972	2,9676	4,2489
6	25381,3516	8,0306	3,2317	5,5962
7	27258,2440	10,9249	3,4706	7,6132
8	28917,3357	15,6858	3,6819	10,9309
9	30618,3108	20,8578	3,8984	14,5351
10	31694,1305	18,0000	4,0354	12,5436

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31821,5636	29,9798	4,0516	20,8919

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1250



zusätzliche Anmerkungen: Probe war nicht grade. Höhe variierte zwischen 129 und 138mm

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T45 D5 #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		134	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9502	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,2591	0,0003	0,0045	0,0002
1	5980,3845	1,1809	0,7614	0,8812
2	13546,5419	2,3695	1,7248	1,7683
3	18552,1341	3,5582	2,3621	2,6554
4	21573,5236	4,7469	2,7468	3,5425
5	23602,9446	5,9356	3,0052	4,4296
6	25556,8529	7,5854	3,2540	5,6607
7	27499,3710	10,0809	3,5013	7,5231
8	29202,2458	13,8476	3,7181	10,3340
9	30696,5546	20,8177	3,9084	15,5356
10	31675,9479	17,1428	4,0331	12,7932

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31796,8735	29,9775	4,0485	22,3712

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1307

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

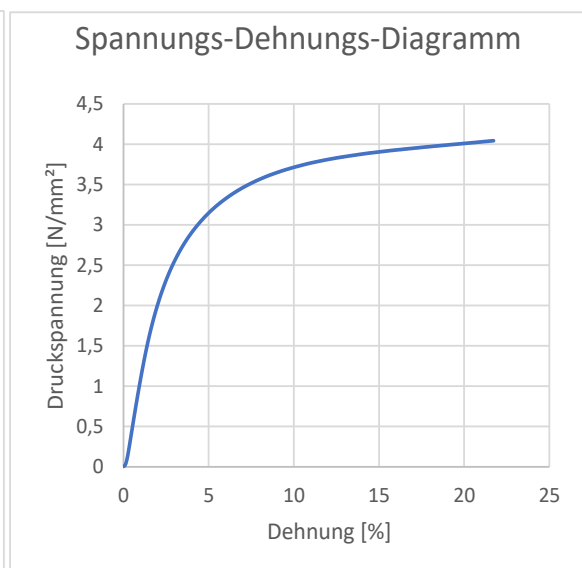
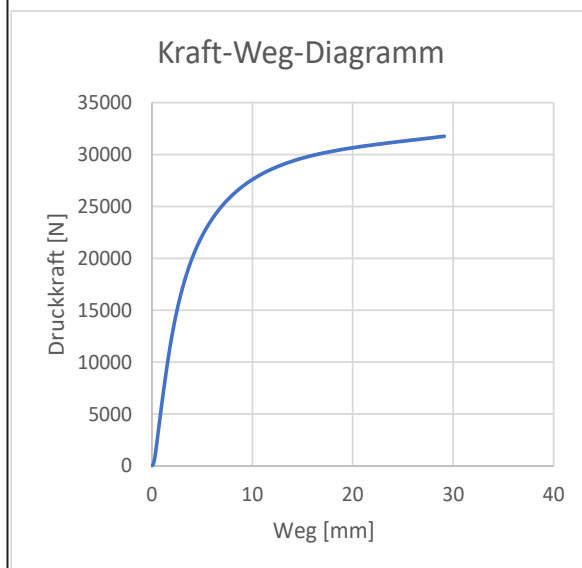
Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T45 D5,5 #1	Höhe [mm] 134	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
	Masse [g] 1000	Rohdichte [g/cm ³] 0,9502	
Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,3517	0,0003	0,0041	0,0002
1	7628,5729	1,2090	0,9713	0,9022
2	14534,3515	2,3903	1,8506	1,7838
3	18848,2008	3,5715	2,3998	2,6653
4	21700,0471	4,7528	2,7629	3,5469
5	23707,1549	5,9349	3,0185	4,4290
6	25625,0229	7,5197	3,2627	5,6117
7	27582,7033	9,9869	3,5119	7,4529
8	29279,0091	13,7350	3,7279	10,2500
9	30765,4354	20,7702	3,9172	15,5001
10	31740,7450	17,1428	4,0414	12,7932

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31851,8355	29,9724	4,0555	22,3675

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1467



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

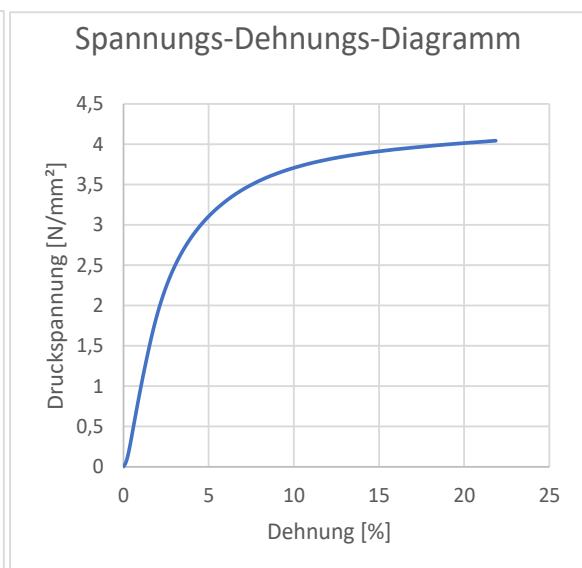
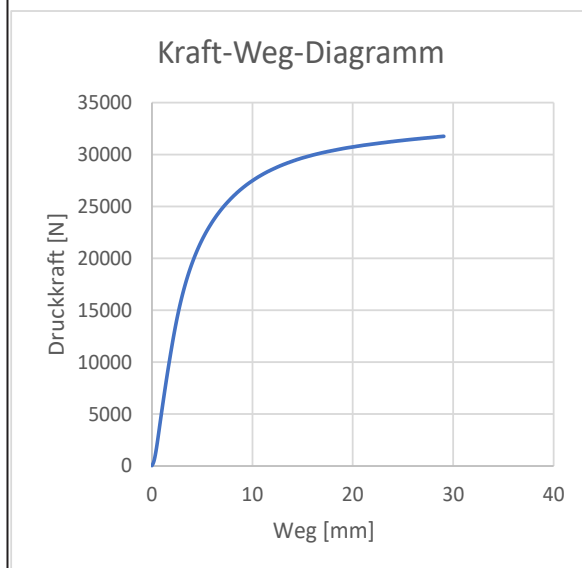
Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

Probekörper: T45 D5,5 #2	Höhe [mm] 133	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
	Masse [g] 1000	Rohdichte [g/cm ³] 0,9573	
Ergebnisse:			

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	33,6752	0,0003	0,0043	0,0002
1	6713,9850	1,1921	0,8549	0,8963
2	13739,2626	2,3976	1,7493	1,8027
3	18416,7040	3,6030	2,3449	2,7090
4	21422,4285	4,8085	2,7276	3,6154
5	23519,7903	6,0140	2,9946	4,5218
6	25444,4570	7,5584	3,2397	5,6830
7	27490,6228	10,0209	3,5002	7,5345
8	29238,9586	13,6475	3,7228	10,2613
9	30789,9218	20,3797	3,9203	15,3230
10	31722,2591	17,1428	4,0390	12,8894

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31834,2073	29,9690	4,0533	22,5331

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1038



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Versuchsprotokolle

	Probekörper: T45 D5,5 #3	Höhe [mm] 134	Durchmesser [mm] 100	Fläche [mm ²] 7853,98
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	Ergebnisse:	1000	0,9502	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	47,6814	0,0004	0,0061	0,0003
1	4984,0247	1,3128	0,6346	0,9797
2	11915,8109	2,5976	1,5172	1,9385
3	17159,5535	3,8825	2,1848	2,8974
4	20772,1626	5,1674	2,6448	3,8562
5	23259,3949	6,4522	2,9615	4,8151
6	25224,5154	7,8795	3,2117	5,8802
7	27480,9233	10,3465	3,4990	7,7213
8	29356,4000	13,9379	3,7378	10,4014
9	31055,9081	20,6615	3,9542	15,4190
10	32293,5500	17,9999	4,1117	13,4328

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
32397,0521	29,9677	4,1249	22,3639

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0106

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

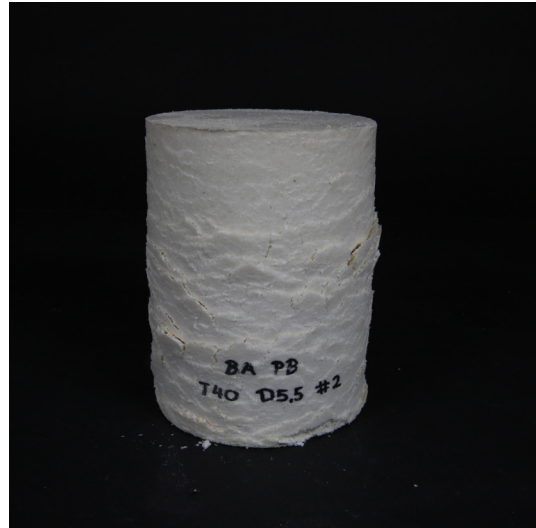
zusätzliche Anmerkungen:

Anhang D - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.2

Versuchsreihe 2: Temperaturbereich 35°C - 45°C, Presskraftbereich 35kN-55kN
Fotos der Prüfkörper



T35 D4,5



T40 D5,5

Anhang E - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.3

Versuchsreihe 3: Steigerung der Presskraft auf 100kN Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D10 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		154	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8268	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,7633	0,0005	0,0042	0,0003
1	7382,3989	1,3901	0,9400	0,9026
2	14491,8216	2,7872	1,8452	1,8099
3	20242,2366	4,1844	2,5773	2,7171
4	24252,6432	5,5815	3,0879	3,6244
5	26707,1018	6,9820	3,4005	4,5338
6	29071,8174	9,1844	3,7015	5,9639
7	31163,7571	12,9191	3,9679	8,3890
8	32907,9312	20,7949	4,1900	13,5032
9	33720,5663	32,0547	4,2934	20,8147
10	27066,8158	19,5961	3,4463	12,7247

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
33756,0403	30,8161	4,2980	20,0104

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,5163

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang E - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.3

Versuchsreihe 3: Steigerung der Presskraft auf 100kN Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D10 #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		154	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8268	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,1691	0,0006	0,0045	0,0004
1	9801,2398	1,5130	1,2479	0,9825
2	18583,4605	3,0194	2,3661	1,9606
3	23624,0860	4,5257	3,0079	2,9388
4	26561,5865	6,0320	3,3819	3,9169
5	29051,6648	8,1883	3,6990	5,3171
6	31362,5541	12,0148	3,9932	7,8018
7	33303,4195	20,0307	4,2403	13,0069
8	34759,0177	30,9439	4,4257	20,0935
9	36339,7330	41,0206	4,6269	26,6367
10	37850,5929	27,7778	4,8193	18,0375

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
38014,1816	49,9714	4,8401	32,4489

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,6397

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang E - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.2.3

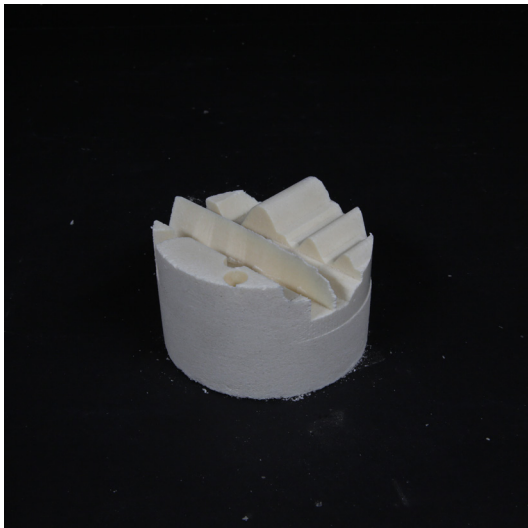
Versuchsreihe 3: Steigerung der Presskraft auf 100kN
Fotos der Prüfkörper



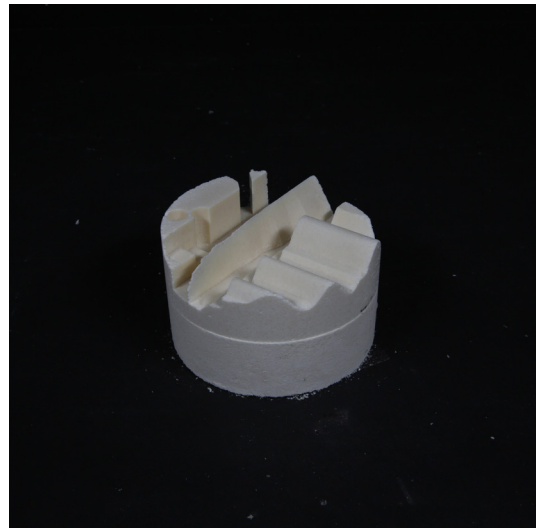
Fräsen T40 D10 #1



Fräsen T40 D10 #2



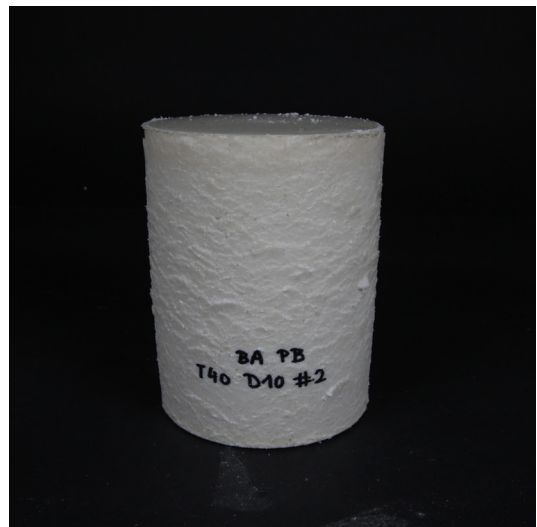
Fräsen T40 D10 #3



Fräsen T40 D10 #4



T40 D10 #1



T40 D10 #2

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 halbe Höhe #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		78	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
			0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,2591	0,0000	0,0046	0,0001
1	1498,3811	0,5584	0,1908	0,7159
2	3009,9795	1,0128	0,3832	1,2984
3	4338,9710	1,5123	0,5525	1,9389
4	6020,7564	2,4118	0,7666	3,0921
5	7320,2286	3,3565	0,9320	4,3032
6	8653,6607	4,4895	1,1018	5,7557
7	10010,4957	5,8180	1,2746	7,4589
8	11299,9493	7,3435	1,4388	9,4147
9	12528,1017	9,5058	1,5951	12,1870
10	12199,3753	8,3756	1,5533	10,7379

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
12964,2774	11,5910	1,6507	14,8603

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,0157

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 halbe Höhe #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		78	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
			0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,4625	0,0000	0,0052	0,0000
1	1202,8086	0,6048	0,1531	0,7754
2	2394,9769	0,9869	0,3049	1,2652
3	3453,7224	1,3740	0,4397	1,7616
4	4918,9706	2,0881	0,6263	2,6771
5	6076,2901	2,8556	0,7737	3,6610
6	7177,5300	3,7584	0,9139	4,8184
7	8318,8401	4,8531	1,0592	6,2219
8	9408,2164	6,0939	1,1979	7,8127
9	10456,2742	7,6872	1,3313	9,8554
10	10403,3634	6,9299	1,3246	8,8845

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10998,2536	9,5899	1,4003	12,2947

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9328

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 halbe Höhe #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		79	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
			0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,6940	0,0000	0,0049	0,0001
1	1263,4176	0,5773	0,1609	0,7308
2	2473,0458	0,9871	0,3149	1,2495
3	3802,3636	1,5425	0,4841	1,9526
4	5197,6768	2,3621	0,6618	2,9900
5	6361,2143	3,2722	0,8099	4,1421
6	7603,3105	4,4200	0,9681	5,5950
7	8798,2708	5,6885	1,1202	7,2007
8	9941,3493	7,1461	1,2658	9,0457
9	11045,6185	9,2663	1,4064	11,7295
10	10387,5741	7,3471	1,3226	9,3001

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
11318,7871	10,9511	1,4412	13,8622

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9047

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 halbe Höhe #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	75	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	1,6977	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	29,4695	0,0010	0,0038	0,0014
1	9172,7319	1,0701	1,1679	1,4268
2	19013,8015	2,0317	2,4209	2,7089
3	24451,2954	2,9933	3,1132	3,9910
4	27650,2886	3,9828	3,5205	5,3104
5	30870,2533	5,8382	3,9305	7,7842
6	33530,6088	9,7943	4,2692	13,0591
7	35558,9716	16,2972	4,5275	21,7297
8	37915,3819	21,8188	4,8275	29,0917
9	40478,8058	26,3552	5,1539	35,1403
10	40129,3164	16,9782	5,1094	22,6377

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
42755,0421	30,0283	5,4437	40,0378

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,4408

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 halbe Höhe #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	76	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	1,6753	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,5623	0,0009	0,0044	0,0012
1	9296,0706	1,0261	1,1836	1,3501
2	19060,2664	2,0103	2,4268	2,6452
3	24398,4023	2,9946	3,1065	3,9402
4	27606,5698	4,0338	3,5150	5,3076
5	30888,6520	6,0811	3,9329	8,0015
6	33548,0373	10,4586	4,2715	13,7613
7	35665,1301	17,0113	4,5410	22,3833
8	38155,1013	22,3662	4,8581	29,4292
9	40855,2978	26,5101	5,2019	34,8817
10	43537,6923	16,2497	5,5434	21,3811

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
43617,0041	29,9818	5,5535	39,4498

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,4371

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 halbe Höhe #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		76	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	1,6753	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	30,5741	0,0009	0,0039	0,0011
1	9129,7516	1,1056	1,1624	1,4548
2	18619,9956	2,0795	2,3708	2,7362
3	23967,1755	3,0533	3,0516	4,0175
4	27176,9845	4,0666	3,4603	5,3508
5	30454,2074	6,0140	3,8776	7,9132
6	33148,2828	9,9821	4,2206	13,1344
7	35260,7250	16,4559	4,4895	21,6525
8	37656,1021	21,9308	4,7945	28,8563
9	40309,7524	26,2573	5,1324	34,5490
10	42915,2551	16,9564	5,4641	22,3110

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
43006,1024	29,9767	5,4757	39,4431

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,3713

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Würfel #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,5787	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,6910	0,0000	0,0027	0,0000
1	1348,6315	0,8295	0,0937	0,6912
2	2797,5489	1,6030	0,1943	1,3359
3	3889,8509	2,3766	0,2701	1,9805
4	4819,7717	3,2300	0,3347	2,6917
5	6147,1161	4,7539	0,4269	3,9616
6	7320,0763	6,3010	0,5083	5,2509
7	8369,7421	7,8482	0,5812	6,5402
8	9302,3371	9,4543	0,6460	7,8786
9	10240,1886	11,6416	0,7111	9,7013
10	9759,9940	9,9039	0,6778	8,2532

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10727,3564	14,7328	1,3658	12,2773

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9033

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Würfel #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		124	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1250	0,7000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	39,4311	0,0000	0,0027	0,0000
1	1266,3898	0,8503	0,0879	0,6857
2	2633,5953	1,6134	0,1829	1,3011
3	3679,8821	2,3765	0,2555	1,9165
4	4684,4616	3,3511	0,3253	2,7025
5	5927,7934	4,8762	0,4117	3,9325
6	6998,7576	6,4024	0,4860	5,1632
7	7949,2861	7,9375	0,5520	6,4012
8	8871,7722	9,7528	0,6161	7,8651
9	9775,4782	12,4787	0,6789	10,0635
10	9425,5810	11,2278	0,6546	9,0547

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10156,5013	16,2092	1,2932	13,0720

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8731

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Würfel #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		123	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1250	0,7057	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,8743	0,0000	0,0027	0,0000
1	1525,7004	0,9243	0,1060	0,7514
2	3043,7446	1,7580	0,2114	1,4293
3	4193,9985	2,5917	0,2912	2,1071
4	5227,2351	3,5631	0,3630	2,8968
5	6653,8464	5,2235	0,4621	4,2468
6	7903,4374	6,8910	0,5488	5,6024
7	9016,8890	8,5594	0,6262	6,9588
8	10027,6323	10,4152	0,6964	8,4677
9	11031,3637	13,1262	0,7661	10,6717
10	10384,5011	11,4034	0,7211	9,2711

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
11419,2644	16,2170	1,4539	13,1845

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9367

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Würfel #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,5787	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,8425	0,0000	0,0024	0,0000
1	9301,6960	0,8739	0,6460	0,7283
2	21522,2559	1,7500	1,4946	1,4583
3	30127,5172	2,6261	2,0922	2,1884
4	36322,3717	3,5022	2,5224	2,9185
5	40792,6954	4,3783	2,8328	3,6486
6	44038,0180	5,2543	3,0582	4,3786
7	46511,7931	6,1304	3,2300	5,1087
8	48414,6969	7,0064	3,3621	5,8387
9	49934,8583	7,8926	3,4677	6,5771
10	43141,2422	5,4046	2,9959	4,5038

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50237,0564	8,0971	6,3964	6,7476

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
5,8813

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Würfel #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,5787	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	41,0974	0,0000	0,0029	0,0000
1	5183,1707	0,8184	0,3599	0,6820
2	17336,6943	1,6212	1,2039	1,3510
3	26723,6685	2,4240	1,8558	2,0200
4	33653,0543	3,2268	2,3370	2,6890
5	38800,7650	4,0296	2,6945	3,3580
6	42622,5699	4,8324	2,9599	4,0270
7	45524,6255	5,6352	3,1614	4,6960
8	47777,0376	6,4380	3,3178	5,3650
9	49548,5233	7,2408	3,4409	6,0340
10	44653,1047	4,7571	3,1009	3,9643

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50237,3242	7,6043	6,3964	6,3369

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
5,9343

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Würfel #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		120	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,5787	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,0087	0,0000	0,0028	0,0000
1	4567,3736	0,6388	0,3172	0,5323
2	13513,4702	1,3048	0,9384	1,0873
3	22941,5720	1,9707	1,5932	1,6423
4	30511,9061	2,6367	2,1189	2,1973
5	36346,1167	3,3027	2,5240	2,7522
6	40826,5519	3,9686	2,8352	3,3072
7	44314,2522	4,6346	3,0774	3,8622
8	47081,0846	5,3006	3,2695	4,4172
9	49297,6691	5,9666	3,4234	4,9721
10	45441,5653	4,5030	3,1557	3,7525

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50235,8080	6,2999	6,3962	5,2499

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
6,2891

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Würfel #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		123	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,5646	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,8425	0,0000	0,0024	0,0000
1	9301,6960	0,8739	0,6460	0,7105
2	21522,2559	1,7500	1,4946	1,4228
3	30127,5172	2,6261	2,0922	2,1350
4	36322,3717	3,5022	2,5224	2,8473
5	40792,6954	4,3783	2,8328	3,5596
6	44038,0180	5,2543	3,0582	4,2718
7	46511,7931	6,1304	3,2300	4,9841
8	48414,6969	7,0064	3,3621	5,6963
9	49934,8583	7,8926	3,4677	6,4167
10	43141,2422	5,4046	2,9959	4,3940

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50237,0564	8,0971	6,3964	6,5830

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
5,9270

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Würfel #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		123	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,5646	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	41,0974	0,0000	0,0029	0,0000
1	5183,1707	0,8184	0,3599	0,6654
2	17336,6943	1,6212	1,2039	1,3180
3	26723,6685	2,4240	1,8558	1,9707
4	33653,0543	3,2268	2,3370	2,6234
5	38800,7650	4,0296	2,6945	3,2761
6	42622,5699	4,8324	2,9599	3,9288
7	45524,6255	5,6352	3,1614	4,5815
8	47777,0376	6,4380	3,3178	5,2341
9	49548,5233	7,2408	3,4409	5,8868
10	44653,1047	4,7571	3,1009	3,8676

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50237,3242	7,6043	6,3964	6,1824

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
5,9870

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

Einfluss der Prüfkörpergeometrie Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Würfel #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		118	120	14400
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,5885	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,0087	0,0000	0,0028	0,0000
1	4567,3736	0,6388	0,3172	0,5413
2	13513,4702	1,3048	0,9384	1,1057
3	22941,5720	1,9707	1,5932	1,6701
4	30511,9061	2,6367	2,1189	2,2345
5	36346,1167	3,3027	2,5240	2,7989
6	40826,5519	3,9686	2,8352	3,3633
7	44314,2522	4,6346	3,0774	3,9276
8	47081,0846	5,3006	3,2695	4,4920
9	49297,6691	5,9666	3,4234	5,0564
10	45441,5653	4,5030	3,1557	3,8161

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50235,8080	6,2999	6,3962	5,3389

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
6,2499

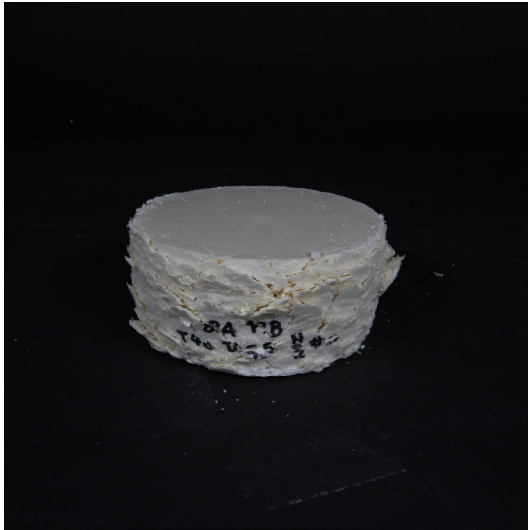
Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

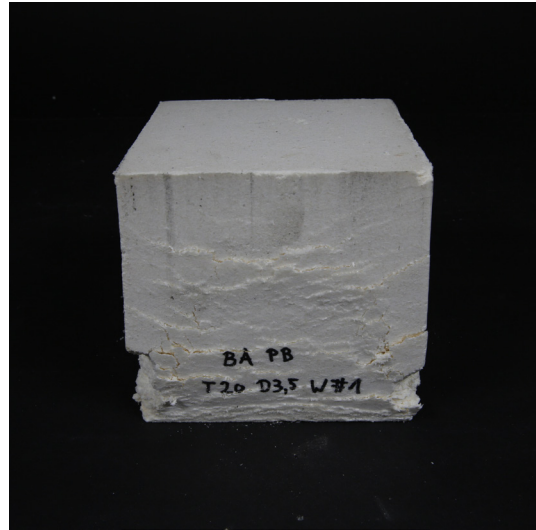
zusätzliche Anmerkungen:

Anhang F- Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.1

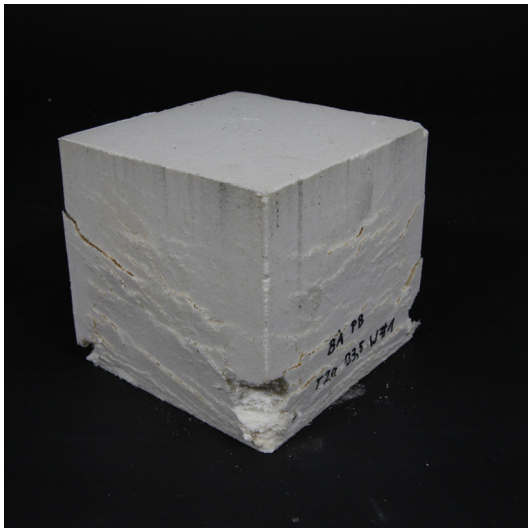
Einfluss der Prüfkörpergeometrie
Fotos der Prüfkörper



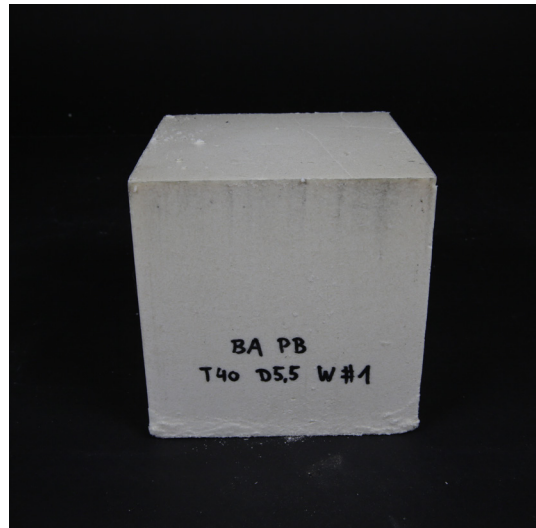
T40 D5,5 H_2



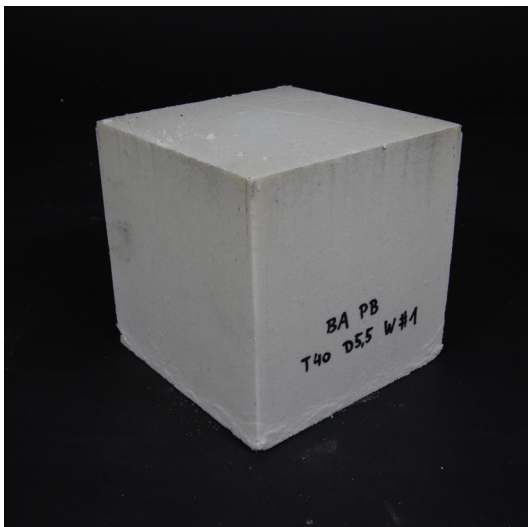
T20 D3,5 W #1



T20 D3,5 W #2



T40 D5,5 W #1



T40 D5,5 W #2

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Kriechen #7		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]	
		156,9	100	7854	
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]		
		1000	0,8115		

Punkt	Zeit t [s]	Weg L [mm]	Zeit t [%]	Dehnung $\Delta L / \Delta L_{\text{final}}$ [%]	Dehnung $\Delta L / L_0$ [%]
0	908,4508	3,7415	2,1029	37,4802	2,3846
1	1817,4541	4,4414	4,2070	44,4914	2,8307
2	2726,4575	4,9252	6,3112	49,3378	3,1391
3	3635,4609	5,3050	8,4153	53,1424	3,3811
4	4544,4642	5,6229	10,5195	56,3270	3,5837
5	5498,9144	5,9129	12,7288	59,2324	3,7686
6	6498,8181	6,1812	15,0434	61,9203	3,9396
7	7559,2992	6,4355	17,4982	64,4678	4,1017
8	8736,3988	6,6901	20,2229	67,0177	4,2639
9	10199,8640	6,9749	23,6105	69,8711	4,4455
10	18356,7655	8,1562	42,4921	81,7046	5,1984

Weg-Zeit-Diagramm

Dehnungs-Zeit-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Kriechen #8		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]	
		151,1	100	7854	
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]		
		1000	0,8426		

Punkt	Zeit t [s]	Weg L [mm]	Zeit t [%]	Dehnung $\Delta L/\Delta L_{\text{final}}$ [%]	Dehnung $\Delta L/L_0$ [%]
0	908,4508	3,4482	2,1029	37,1387	2,2821
1	1817,4541	4,0969	4,2070	44,1252	2,7114
2	2726,4575	4,5414	6,3112	48,9133	3,0056
3	3635,4609	4,8903	8,4153	52,6703	3,2364
4	4544,4642	5,1810	10,5195	55,8018	3,4289
5	5498,9144	5,4433	12,7288	58,6267	3,6025
6	6498,8181	5,6838	15,0434	61,2167	3,7616
7	7559,2992	5,9107	17,4982	63,6608	3,9118
8	8736,3988	6,1369	20,2229	66,0971	4,0615
9	10199,8640	6,3888	23,6105	68,8104	4,2282
10	18356,7655	7,4401	42,4920	80,1334	4,9240

Weg-Zeit-Diagramm

Dehnungs-Zeit-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Kriechen #9		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]	
		152,6	100	7854	
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]		
		1000	0,8344		

Punkt	Zeit t [s]	Weg L [mm]	Zeit t [%]	Dehnung $\Delta L/\Delta L_{\text{final}}$ [%]	Dehnung $\Delta L/L_0$ [%]
0	908,4508	4,1542	2,1029	40,6485	2,7223
1	1817,4541	4,8260	4,2070	47,2222	3,1625
2	2726,4575	5,2911	6,3112	51,7734	3,4673
3	3635,4609	5,6562	8,4153	55,3463	3,7066
4	4544,4642	5,9612	10,5195	58,3299	3,9064
5	5498,9144	6,2373	12,7288	61,0316	4,0873
6	6498,8181	6,4921	15,0434	63,5248	4,2543
7	7559,2992	6,7327	17,4982	65,8796	4,4120
8	8736,3988	6,9723	20,2229	68,2237	4,5690
9	10199,8640	7,2377	23,6105	70,8208	4,7429
10	18356,7655	8,3469	42,4920	81,6738	5,4698

Weg-Zeit-Diagramm

Dehnungs-Zeit-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Kriechen #56		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]	
		156,9	100	7854	
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]		
		1000	0,8115		

Punkt	Zeit t [s]	Weg L [mm]	Zeit t [%]	Dehnung $\Delta L / \Delta L_{\text{final}}$ [%]	Dehnung $\Delta L / L_0$ [%]
0	908,4508	1,2115	2,1029	49,6094	0,7722
1	1817,4541	1,3269	4,2070	54,3345	0,8457
2	2726,4575	1,4069	6,3112	57,6088	0,8967
3	3635,4609	1,4705	8,4153	60,2127	0,9372
4	4544,4642	1,5245	10,5195	62,4246	0,9716
5	5498,9144	1,5739	12,7288	64,4500	1,0032
6	6498,8181	1,6197	15,0434	66,3250	1,0323
7	7559,2992	1,6637	17,4982	68,1250	1,0604
8	8736,3988	1,7079	20,2229	69,9353	1,0885
9	10199,8640	1,7584	23,6105	72,0043	1,1207
10	18356,7655	1,9834	42,4921	81,2144	1,2641

Weg-Zeit-Diagramm

Dehnungs-Zeit-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Kriechen #57		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]	
		151,9	100	7854	
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]		
		1000	0,8382		

Punkt	Zeit t [s]	Weg L [mm]	Zeit t [%]	Dehnung $\Delta L / \Delta L_{\text{final}}$ [%]	Dehnung $\Delta L / L_0$ [%]
0	908,4508	1,5720	2,1029	64,0305	1,0349
1	1817,4541	1,6603	4,2070	67,6305	1,0930
2	2726,4575	1,7207	6,3112	70,0876	1,1328
3	3635,4609	1,7684	8,4153	72,0305	1,1642
4	4544,4642	1,8084	10,5195	73,6623	1,1905
5	5498,9144	1,8452	12,7288	75,1588	1,2147
6	6498,8181	1,8794	15,0434	76,5525	1,2372
7	7559,2992	1,9119	17,4982	77,8783	1,2587
8	8736,3988	1,9450	20,2229	79,2264	1,2805
9	10199,8640	1,9826	23,6105	80,7584	1,3052
10	18356,7655	2,1464	42,4920	87,4281	1,4130

Weg-Zeit-Diagramm

Dehnungs-Zeit-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Kriechen #58		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		151,2	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8421	

Punkt	Zeit t [s]	Weg L [mm]	Zeit t [%]	Dehnung $\Delta L / \Delta L_{\text{final}}$ [%]	Dehnung $\Delta L / L_0$ [%]
0	908,4508	1,1205	2,1029	58,3297	0,7411
1	1817,4541	1,2114	4,2070	63,0595	0,8012
2	2726,4575	1,2711	6,3112	66,1687	0,8407
3	3635,4609	1,3170	8,4153	68,5556	0,8710
4	4544,4642	1,3548	10,5195	70,5237	0,8960
5	5498,9144	1,3889	12,7288	72,3011	0,9186
6	6498,8181	1,4200	15,0434	73,9194	0,9392
7	7559,2992	1,4497	17,4982	75,4633	0,9588
8	8736,3988	1,4793	20,2229	77,0054	0,9784
9	10199,8640	1,5127	23,6105	78,7424	1,0004
10	18356,7655	1,6582	42,4921	86,3187	1,0967

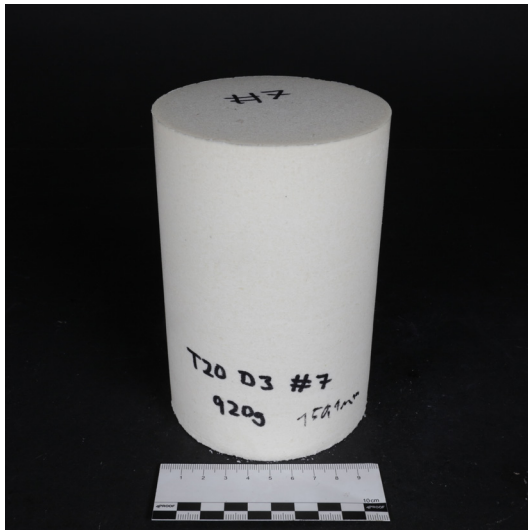
Weg-Zeit-Diagramm

Dehnungs-Zeit-Diagramm

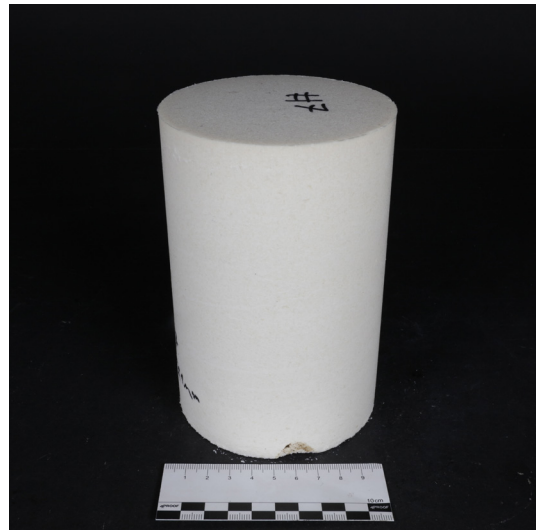
zusätzliche Anmerkungen:

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

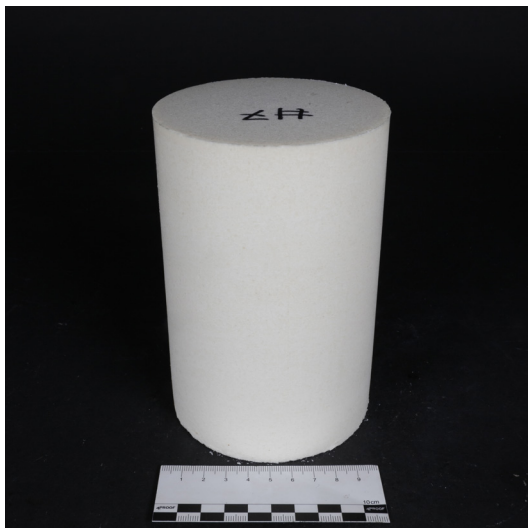
Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Fotos der Prüfkörper



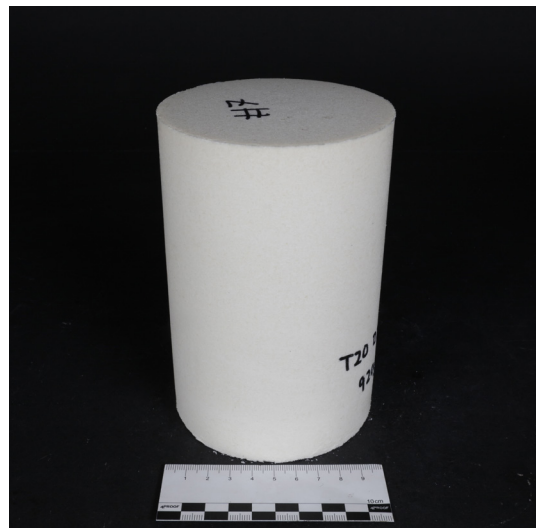
T20 D3 Kriechen #7.1



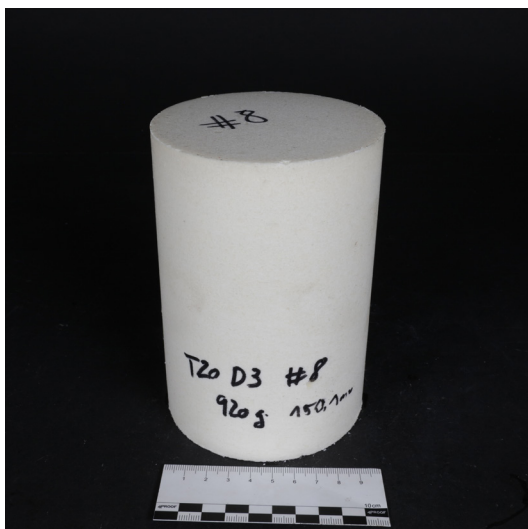
T20 D3 Kriechen #7.2



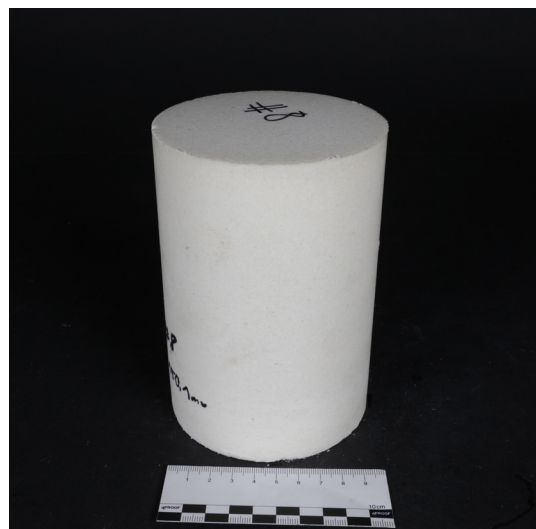
T20 D3 Kriechen #7.3



T20 D3 Kriechen #7.4



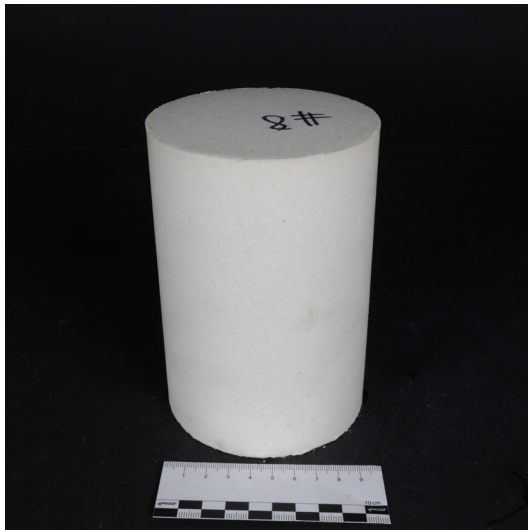
T20 D3 Kriechen #8.1



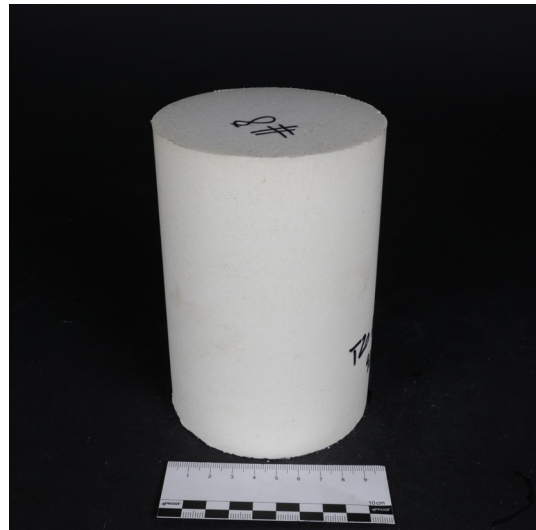
T20 D3 Kriechen #8.2

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

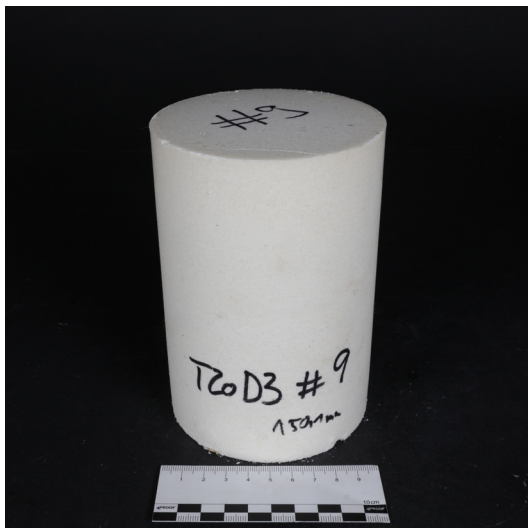
Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Fotos der Prüfkörper



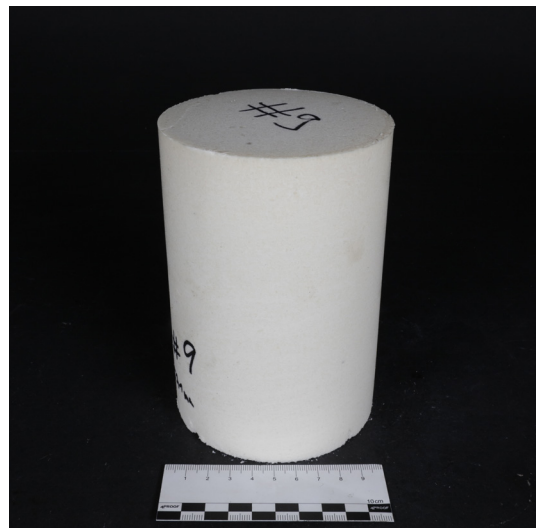
T20 D3 Kriechen #8.3



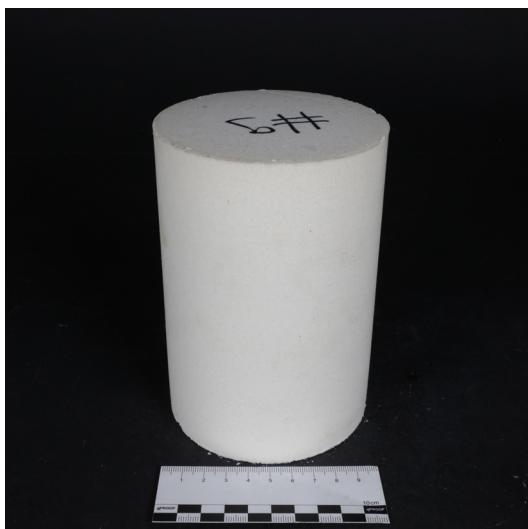
T20 D3 Kriechen #8.4



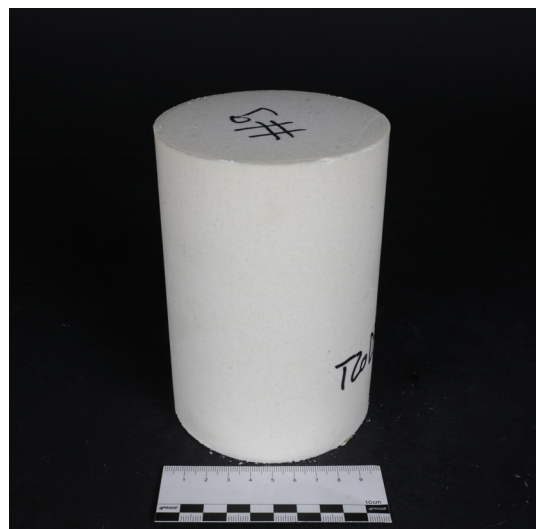
T20 D3 Kriechen #9.1



T20 D3 Kriechen #9.2



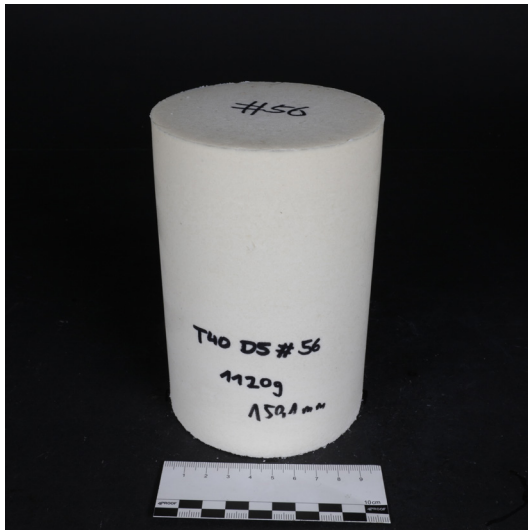
T20 D3 Kriechen #9.3



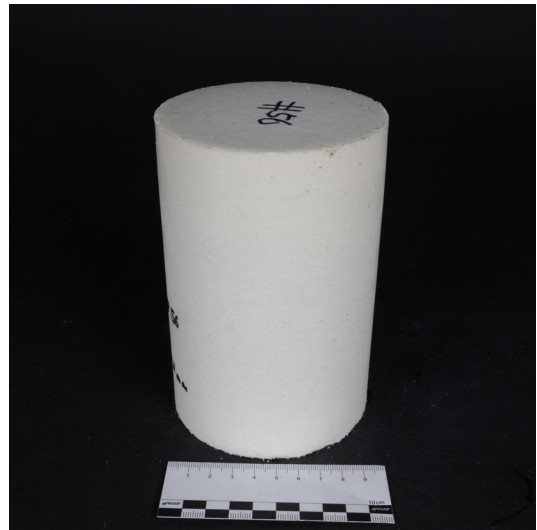
T20 D3 Kriechen #9.4

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

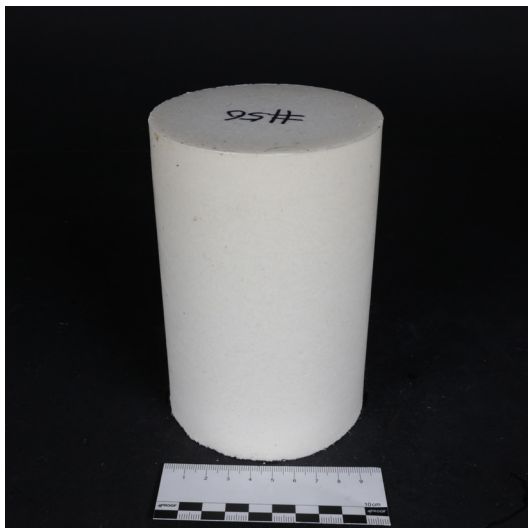
Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Fotos der Prüfkörper



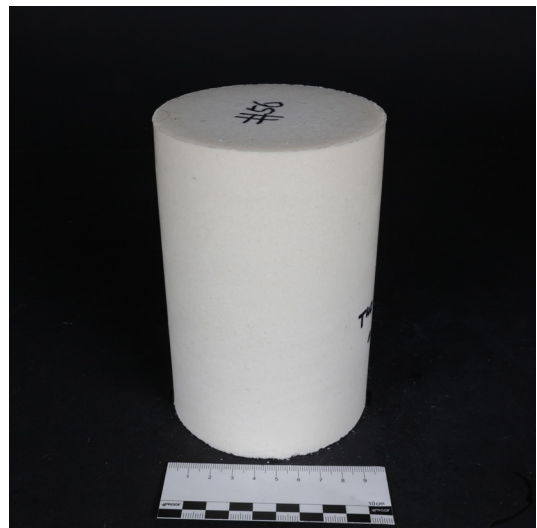
T40 D5 Kriechen #56.1



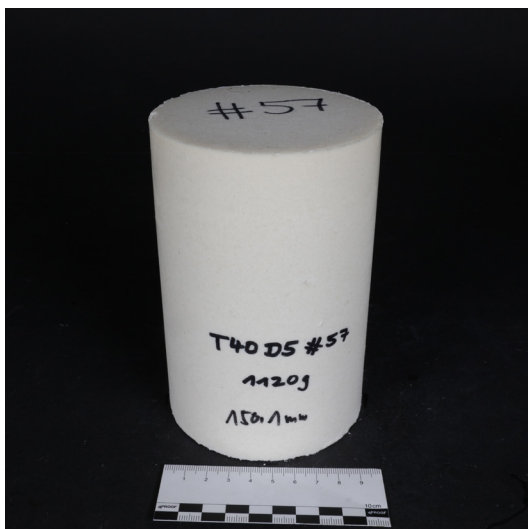
T40 D5 Kriechen #56.2



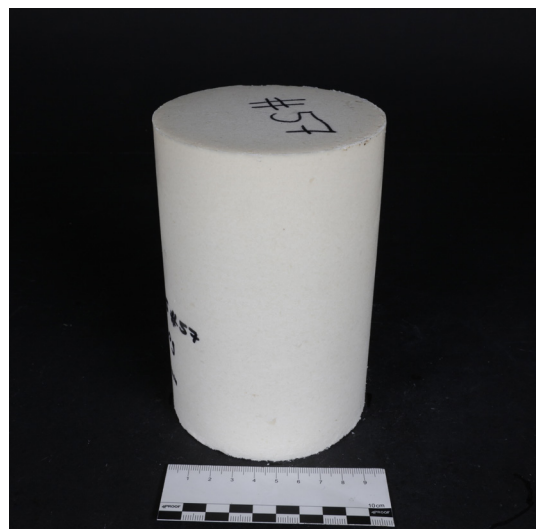
T40 D5 Kriechen #56.3



T40 D5 Kriechen #56.4



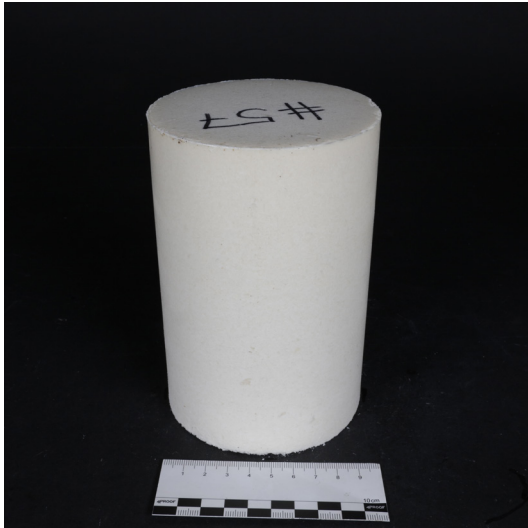
T40 D5 Kriechen #57.1



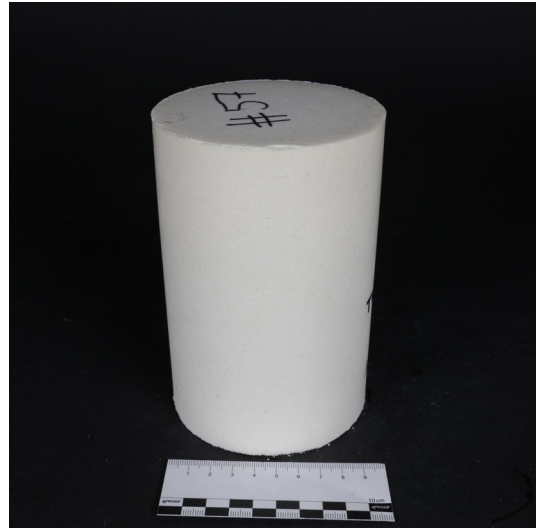
T40 D5 Kriechen #57.2

Anhang G - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.2

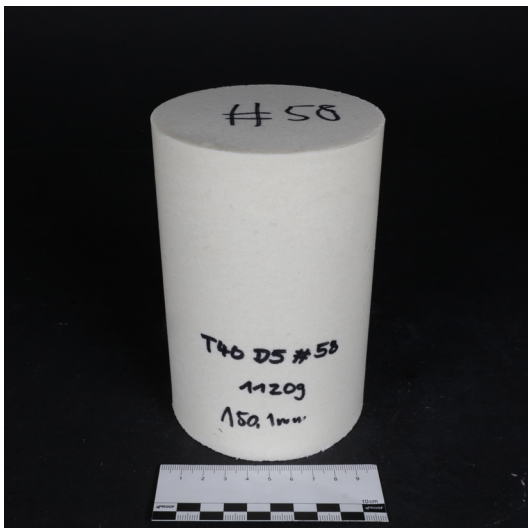
Zeitstandfestigkeit (Kriechen) von gepressten Wachsprüfkörpern
Fotos der Prüfkörper



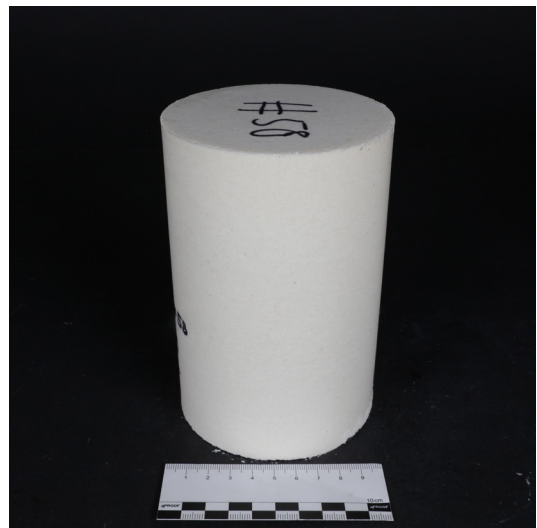
T40 D5 Kriechen #57.3



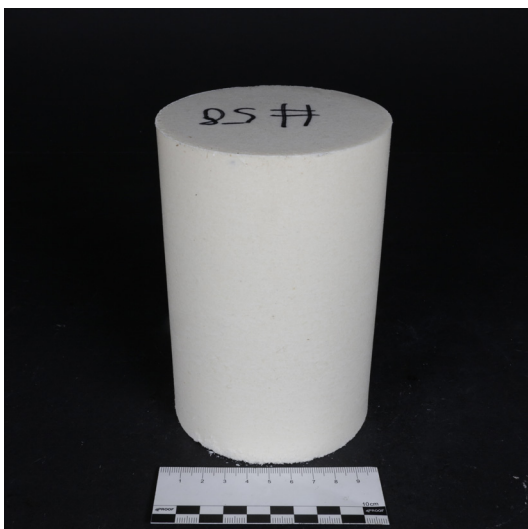
T40 D5 Kriechen #57.4



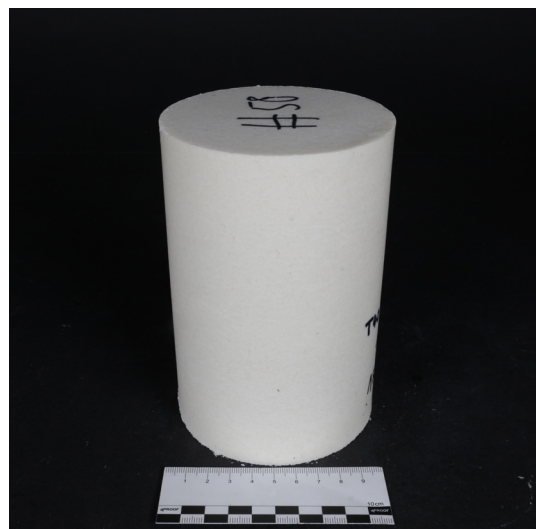
T40 D5 Kriechen #58.1



T40 D5 Kriechen #58.2



T40 D5 Kriechen #58.3



T40 D5 Kriechen #58.4

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Baumwolle 20% #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	164	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,7792	0,0000	0,0052	0,0000
1	1020,3020	4,1904	0,1299	2,5551
2	2043,4383	7,8143	0,2602	4,7648
3	3080,8855	10,8883	0,3923	6,6392
4	4169,1422	13,7471	0,5308	8,3824
5	5210,7085	16,2904	0,6634	9,9332
6	6239,3111	18,7184	0,7944	11,4137
7	7274,8946	21,1581	0,9263	12,9013
8	8325,2992	23,7200	1,0600	14,4634
9	9379,1149	26,5249	1,1942	16,1737
10	10351,6402	29,0000	1,3180	18,1951

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10389,6586	29,9959	1,3229	18,2902

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,2755

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Baumwolle 20% #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	153	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8322	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,7698	0,0024	0,0047	0,0016
1	7374,4337	2,5204	0,9389	1,6473
2	17201,1317	4,8257	2,1901	3,1541
3	24201,0329	7,1311	3,0814	4,6609
4	29410,5689	9,4365	3,7447	6,1677
5	33294,1756	11,7453	4,2391	7,6766
6	37000,7497	14,7060	4,7111	9,6118
7	40985,7767	19,1284	5,2185	12,5022
8	44610,3537	24,5008	5,6800	16,0136
9	48110,5961	30,6391	6,1256	20,0256
10	42376,5741	18,5262	5,3956	12,1086

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50224,2196	34,5665	6,3947	22,5925

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,2450

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 10% #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		156	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
			0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,2467	0,0000	0,0049	0,0000
1	1229,5642	1,5891	0,1566	1,0187
2	2412,8762	2,9183	0,3072	1,8707
3	3329,7896	4,2757	0,4240	2,7409
4	4346,8261	6,0132	0,5535	3,8546
5	5389,1124	7,9704	0,6862	5,1092
6	6340,5328	10,0010	0,8073	6,4109
7	7249,6131	12,6404	0,9230	8,1028
8	8017,4682	18,1891	1,0208	11,6597
9	8227,0686	24,7974	1,0475	15,8958
10	7705,9177	19,0154	0,9811	12,1894

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8268,2227	27,4482	1,0527	17,5950

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,6744

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 10% #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	157	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	52,9080	0,0000	0,0067	0,0000
1	1264,1586	1,2613	0,1610	0,8034
2	2268,4357	2,5294	0,2888	1,6111
3	3193,8311	4,0608	0,4067	2,5865
4	4188,2102	5,9562	0,5333	3,7938
5	5103,5810	7,8643	0,6498	5,0091
6	5983,3426	9,9500	0,7618	6,3376
7	6843,9473	12,9543	0,8714	8,2512
8	7666,8792	17,2688	0,9762	10,9992
9	8401,3178	22,7015	1,0697	14,4596
10	7950,7083	17,4609	1,0123	11,1216

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8503,6103	25,4226	1,0827	16,1928

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,6487

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 10% #3	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	154	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	45,2253	0,0000	0,0058	0,0000
1	1159,2226	1,0635	0,1476	0,6906
2	2504,6161	2,4696	0,3189	1,6036
3	3501,8496	3,8973	0,4459	2,5307
4	4540,9060	5,6340	0,5782	3,6584
5	5651,6083	7,7089	0,7196	5,0058
6	6663,5676	9,8766	0,8484	6,4134
7	7636,7667	12,6607	0,9723	8,2212
8	8573,5466	16,5992	1,0916	10,7787
9	9166,4929	23,1470	1,1671	15,0305
10	8449,1027	18,0153	1,0758	11,6983

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
9168,3835	23,4297	1,1674	15,2141

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7182

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 20% #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	159	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,3239	0,0001	0,0045	0,0001
1	1383,7653	2,5982	0,1762	1,6341
2	2570,6747	5,2808	0,3273	3,3212
3	3795,8689	7,9442	0,4833	4,9963
4	5097,5706	10,6001	0,6490	6,6667
5	6409,5734	13,2585	0,8161	8,3387
6	7673,8953	15,9349	0,9771	10,0220
7	8898,0645	19,0038	1,1329	11,9521
8	10070,2509	24,0691	1,2822	15,1378
9	11185,5439	30,6444	1,4242	19,2732
10	10412,2147	23,9544	1,3257	15,0657

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
11344,6176	33,5265	1,4444	21,0859

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4833

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 20% #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	159	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,6449	0,0001	0,0057	0,0000
1	1326,8144	2,7410	0,1689	1,7239
2	2506,9528	5,3072	0,3192	3,3379
3	3714,1727	7,8701	0,4729	4,9498
4	4999,5886	10,4305	0,6366	6,5601
5	6315,8569	12,9884	0,8042	8,1688
6	7592,8402	15,5505	0,9668	9,7802
7	8790,0182	18,2351	1,1192	11,4686
8	9928,8244	22,7841	1,2642	14,3296
9	10908,2088	29,9410	1,3889	18,8308
10	9120,1475	19,4628	1,1612	12,2408

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10931,4365	30,6242	1,3918	19,2605

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4777

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 20% #3	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	157	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,3044	0,0001	0,0047	0,0000
1	1370,9344	2,2075	0,1746	1,4061
2	2747,6329	4,9996	0,3498	3,1844
3	4165,1169	7,7916	0,5303	4,9628
4	5650,9553	10,5424	0,7195	6,7149
5	7134,2153	13,2431	0,9084	8,4351
6	8561,8975	15,9978	1,0901	10,1897
7	9879,7046	18,9232	1,2579	12,0530
8	11167,4660	22,4901	1,4219	14,3249
9	12262,0558	28,6087	1,5613	18,2221
10	11304,8657	21,9583	1,4394	13,9862

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
12412,7264	30,9739	1,5804	19,7286

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,5340

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 30% #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		165	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
			0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,3702	0,0001	0,0048	0,0000
1	1175,2604	4,7190	0,1496	2,8600
2	2338,6568	8,6160	0,2978	5,2218
3	3565,1753	11,8785	0,4539	7,1991
4	4725,5511	14,5901	0,6017	8,8425
5	5899,5088	17,2471	0,7511	10,4528
6	7097,6483	20,5927	0,9037	12,4804
7	8272,3102	24,4205	1,0533	14,8003
8	9423,8772	29,1288	1,1999	17,6538
9	10301,4433	36,8612	1,3116	22,3401
10	9133,6053	41,5609	1,1629	25,1884

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
10454,1685	39,7099	1,3311	24,0666

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,2813

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 30% #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	164	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,6990	0,0002	0,0052	0,0001
1	1356,6988	5,6211	0,1727	3,4275
2	2723,1840	10,0363	0,3467	6,1197
3	4119,5624	13,5445	0,5245	8,2588
4	5497,8448	16,5938	0,7000	10,1181
5	6921,8084	19,6280	0,8813	11,9683
6	8319,0454	22,7465	1,0592	13,8698
7	9715,7577	26,4322	1,2370	16,1172
8	11076,3937	31,1616	1,4103	19,0010
9	12410,0861	36,7633	1,5801	22,4167
10	11951,6424	43,0174	1,5217	26,2301

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
12975,0606	42,0662	1,6520	25,6501

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,2661

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 Cellulose 30% #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		169	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
			0,0000	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,3238	0,0000	0,0045	0,0000
1	1171,9546	6,9876	0,1492	4,1347
2	2347,8889	11,9588	0,2989	7,0762
3	3541,3515	15,7903	0,4509	9,3434
4	4804,8779	19,3252	0,6118	11,4350
5	6071,5436	22,7469	0,7731	13,4597
6	7301,2591	26,3652	0,9296	15,6007
7	8504,4524	30,2802	1,0828	17,9173
8	9683,6166	35,0440	1,2330	20,7361
9	10679,9957	42,5048	1,3598	25,1508
10	11577,9519	31,8182	1,4742	18,8273

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
11663,9905	49,9666	1,4851	29,5660

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,1875

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 10% #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	151	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8432	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	35,9444	0,0009	0,0046	0,0006
1	10676,4502	1,7900	1,3594	1,1855
2	20604,7129	3,4870	2,6235	2,3093
3	25937,6096	5,1839	3,3025	3,4331
4	29075,1693	6,8842	3,7020	4,5591
5	31933,5724	9,5552	4,0659	6,3279
6	34458,2726	14,2188	4,3874	9,4164
7	36669,6640	22,9099	4,6689	15,1721
8	38676,7390	32,9395	4,9245	21,8142
9	40775,4883	41,9598	5,1917	27,7879
10	42733,5060	49,9684	5,4410	33,2119

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
42924,9650	49,9684	5,4654	33,0917

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,8135

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 10% #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	151	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8432	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,5181	0,0010	0,0041	0,0007
1	10810,4690	1,7608	1,3764	1,1661
2	20489,9799	3,4973	2,6089	2,3161
3	25722,7944	5,2338	3,2751	3,4661
4	28876,6807	6,9728	3,6767	4,6178
5	31784,1621	9,6499	4,0469	6,3907
6	34400,3273	14,1778	4,3800	9,3893
7	36719,8296	22,2923	4,6753	14,7631
8	38821,7898	32,2923	4,9429	21,3856
9	40967,7953	41,5821	5,2162	27,5378
10	42931,5828	28,5714	5,4662	18,9215

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
43148,5609	49,9779	5,4938	33,0979

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,7725

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 10% #3	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	152	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8377	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	31,7516	0,0012	0,0040	0,0008
1	11009,9703	2,0219	1,4018	1,3302
2	20835,9172	3,7431	2,6529	2,4626
3	26109,7187	5,4642	3,3244	3,5949
4	29270,3942	7,1862	3,7268	4,7278
5	32128,2696	9,7225	4,0907	6,3964
6	34753,5346	14,0112	4,4250	9,2179
7	37094,1760	21,8543	4,7230	14,3778
8	39170,6663	31,8903	4,9874	20,9805
9	41272,1712	41,3564	5,2549	27,2081
10	43248,8992	28,5713	5,5066	18,7969

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
43407,8297	49,9672	5,5269	32,8731

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,8007

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 20% #1	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	155	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8214	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,3106	0,0021	0,0049	0,0013
1	5917,7481	2,3647	0,7535	1,5256
2	16218,3396	4,5079	2,0650	2,9083
3	22523,6432	6,6511	2,8678	4,2911
4	26678,1402	8,7944	3,3968	5,6738
5	29965,1305	11,1872	3,8153	7,2175
6	33708,9389	15,3440	4,2920	9,8994
7	36879,8878	21,2826	4,6957	13,7307
8	39851,0768	30,1906	5,0740	19,4778
9	42690,0976	40,1795	5,4355	25,9222
10	45332,2302	26,9228	5,7719	17,3696

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
45504,9516	49,9483	5,7939	32,2247

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1610

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 20% #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	153	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8322	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	31,9852	0,0028	0,0041	0,0018
1	6875,9811	2,8229	0,8755	1,8451
2	18551,7340	4,8914	2,3621	3,1970
3	25110,2035	6,9598	3,1971	4,5489
4	29269,7929	9,0281	3,7267	5,9007
5	32455,6489	11,3346	4,1324	7,4082
6	36031,2560	15,3732	4,5876	10,0479
7	39050,4935	21,3571	4,9721	13,9589
8	41870,2679	30,4716	5,3311	19,9161
9	44566,5685	40,4197	5,6744	26,4181
10	47050,3622	27,9999	5,9906	18,3006

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
47234,4325	49,9604	6,0141	32,6538

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,3952

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 20% #3	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	152	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8377	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	39,2053	0,0018	0,0050	0,0012
1	8048,9952	2,2982	1,0248	1,5119
2	20183,4837	4,3153	2,5698	2,8390
3	26711,6431	6,3324	3,4010	4,1660
4	30754,9057	8,3495	3,9158	5,4931
5	33908,2782	10,7090	4,3173	7,0454
6	37350,3448	14,8797	4,7556	9,7893
7	40271,3463	21,4187	5,1275	14,0912
8	42944,0665	30,9081	5,4678	20,3343
9	45524,3824	40,6806	5,7963	26,7636
10	47831,3841	27,0833	6,0901	17,8180

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
48052,6296	49,9699	6,1183	32,8749

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,7448

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 30% #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		158	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8058	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,7470	0,0031	0,0042	0,0019
1	6472,0907	3,1365	0,8241	1,9851
2	14460,9991	5,7523	1,8412	3,6407
3	20625,9600	8,3681	2,6262	5,2963
4	25803,4967	10,9839	3,2854	6,9518
5	30039,0807	13,6013	3,8247	8,6084
6	34152,1696	16,8773	4,3484	10,6819
7	38676,6719	22,1120	4,9245	13,9950
8	42556,3565	29,1653	5,4184	18,4591
9	46262,5429	38,8293	5,8903	24,5755
10	49601,6793	49,276	6,3155	31,5998

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
49762,5224	49,9276	6,3360	31,5998

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,4949

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 30% #2	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	157	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8110	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,6083	0,0048	0,0052	0,0030
1	6981,3314	3,4136	0,8889	2,1743
2	15560,8605	6,0688	1,9813	3,8655
3	22007,9599	8,7241	2,8021	5,5567
4	27292,1403	11,3793	3,4749	7,2480
5	31542,0636	14,0387	4,0161	8,9418
6	35868,2845	17,6261	4,5669	11,2268
7	40312,4993	23,1292	5,1327	14,7320
8	44211,7909	30,8281	5,6292	19,6358
9	47906,6390	41,1540	6,0997	26,2127
10	42175,8928	26,0051	5,3700	16,5637

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50222,9287	48,9207	6,3946	31,1597

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,5483

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5,5 Cellulose 30% #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		159	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8008	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	31,5588	0,0030	0,0040	0,0019
1	6328,3701	3,4048	0,8058	2,1414
2	13773,9286	6,1384	1,7538	3,8606
3	19350,1736	8,8719	2,4637	5,5798
4	24014,1930	11,6054	3,0576	7,2990
5	28725,1511	14,3580	3,6574	9,0302
6	32582,8467	17,0945	4,1486	10,7513
7	36038,7752	20,2251	4,5886	12,7202
8	40087,3821	25,3055	5,1041	15,9154
9	43609,0803	31,8001	5,5525	20,0001
10	46731,6587	22,2220	5,9501	13,9761

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
46895,5799	39,9568	5,9709	25,1301

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,2383

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 10% #59	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	157,3	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	990	0,8013	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	41,0588	0,0000	0,0052	0,0000
1	677,1601	1,1775	0,0862	0,7486
2	1343,2571	2,0786	0,1710	1,3214
3	1977,4308	3,2482	0,2518	2,0650
4	2599,5846	4,6915	0,3310	2,9825
5	3220,2340	6,2721	0,4100	3,9873
6	3839,1446	7,8837	0,4888	5,0119
7	4455,2616	9,5082	0,5673	6,0446
8	5071,6901	11,1881	0,6457	7,1126
9	5682,7901	12,9910	0,7236	8,2588
10	6214,0334	10,0000	0,7912	6,3573

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
6253,0738	14,9968	0,7962	9,5339

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4872

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 891g Wachs mit 99g Gesteinsmehl -> Probe zu hoch, für #60 und# 61 angepasst

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 10% #60	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	154,2	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	950	0,7844	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	48,0033	0,0000	0,0061	0,0000
1	790,4982	0,9181	0,1006	0,5954
2	1538,1401	1,7574	0,1958	1,1397
3	2277,1355	2,9096	0,2899	1,8869
4	2989,4235	4,3738	0,3806	2,8364
5	3695,0778	6,0042	0,4705	3,8938
6	4397,8994	7,6742	0,5600	4,9768
7	5102,1489	9,3685	0,6496	6,0756
8	5802,7506	11,1061	0,7388	7,2024
9	6499,5603	12,9611	0,8275	8,4054
10	7119,1088	10,0000	0,9064	6,4851

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7163,2423	14,9928	0,9121	9,7229

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,5617

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 855g Wachs mit 95g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 10% #61	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	162	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	950	0,7467	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,0517	0,0000	0,0062	0,0000
1	585,8467	0,8418	0,0746	0,5196
2	1130,1627	1,8615	0,1439	1,1490
3	1657,8959	3,2173	0,2111	1,9860
4	2181,4378	4,7810	0,2777	2,9512
5	2704,0510	6,4000	0,3443	3,9506
6	3226,8779	8,0209	0,4109	4,9512
7	3748,6534	9,6569	0,4773	5,9610
8	4269,0904	11,3388	0,5436	6,9993
9	4779,2507	13,1307	0,6085	8,1053
10	5197,4919	12,0000	0,6618	7,4074

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5231,6341	14,9921	0,6661	9,2544

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4135

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 855g Wachs mit 95g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 20% #62	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	159	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1010	0,8088	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,9894	0,0000	0,0057	0,0000
1	508,6913	1,3292	0,0648	0,8360
2	963,8575	3,0487	0,1227	1,9174
3	1403,4378	4,8508	0,1787	3,0508
4	1856,1079	6,5930	0,2363	4,1465
5	2320,4370	8,2163	0,2954	5,1675
6	2790,5805	9,7126	0,3553	6,1086
7	3261,9836	11,1077	0,4153	6,9860
8	3735,6507	12,4380	0,4756	7,8226
9	4209,8864	13,7404	0,5360	8,6418
10	4634,8469	11,2500	0,5901	7,0755

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4665,3070	14,9951	0,5940	9,4309

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,2853

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 808g Wachs mit 202g Gesteinsmehl -> Probe zu hoch, für #63 und #64 angepasst

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 20% #63	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	158,8	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	990	0,7938	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	46,1412	0,0000	0,0059	0,0000
1	489,1957	1,3202	0,0623	0,8314
2	923,6567	3,0024	0,1176	1,8907
3	1339,1252	4,7507	0,1705	2,9916
4	1768,4178	6,4621	0,2252	4,0693
5	2210,5049	8,0700	0,2815	5,0818
6	2658,4922	9,5665	0,3385	6,0243
7	3109,0905	10,9769	0,3959	6,9124
8	3561,6476	12,3334	0,4535	7,7666
9	4013,2746	13,6752	0,5110	8,6116
10	4417,9366	11,2500	0,5625	7,0844

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4446,1700	14,9954	0,5661	9,4430

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,2763

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 792g Wachs mit 198g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 20% #64	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	162	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	990	0,7781	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	47,4173	0,0000	0,0060	0,0000
1	482,4593	1,3366	0,0614	0,8250
2	908,4382	2,9940	0,1157	1,8481
3	1314,0952	4,7114	0,1673	2,9083
4	1732,1376	6,3975	0,2205	3,9491
5	2167,7454	8,0058	0,2760	4,9418
6	2609,0095	9,5118	0,3322	5,8715
7	3052,7855	10,9326	0,3887	6,7485
8	3496,6103	12,3014	0,4452	7,5934
9	3942,4701	13,6632	0,5020	8,4341
10	4334,7350	11,2500	0,5519	6,9444

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4364,9181	14,9987	0,5558	9,2585

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,2793

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 792g Wachs mit 198g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 30% #65	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	156,5	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1050	0,8543	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	45,6519	0,0000	0,0058	0,0000
1	351,1296	1,6300	0,0447	1,0415
2	612,3278	3,3242	0,0780	2,1241
3	893,3743	5,0184	0,1137	3,2066
4	1222,9668	6,7122	0,1557	4,2889
5	1612,7213	8,3887	0,2053	5,3602
6	2036,9383	9,9456	0,2594	6,3550
7	2469,5034	11,3439	0,3144	7,2485
8	2906,4789	12,6309	0,3701	8,0708
9	3343,8585	13,8575	0,4258	8,8547
10	3734,0546	11,2500	0,4754	7,1885

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
3761,0769	14,9981	0,4789	9,5834

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,1872

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 735g Wachs mit 315g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 30% #66	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	156,1	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1050	0,8564	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,3701	0,0000	0,0056	0,0000
1	343,4340	1,6377	0,0437	1,0491
2	616,9380	3,3319	0,0786	2,1345
3	910,1308	5,0261	0,1159	3,2198
4	1252,0129	6,7190	0,1594	4,3043
5	1649,3349	8,3807	0,2100	5,3688
6	2075,6220	9,9130	0,2643	6,3504
7	2509,1087	11,2945	0,3195	7,2354
8	2945,3979	12,5800	0,3750	8,0589
9	3382,2512	13,8142	0,4306	8,8496
10	3776,7171	11,2500	0,4809	7,2069

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
3802,2202	14,9920	0,4841	9,6041

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,1911

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 735g Wachs mit 315g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Gesteinsmehl 30% #67	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	201,5	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1050	0,6635	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	47,1704	0,0000	0,0060	0,0000
1	223,3222	1,4586	0,0284	0,7239
2	389,6782	2,9684	0,0496	1,4732
3	555,3011	4,4783	0,0707	2,2225
4	731,0584	5,9881	0,0931	2,9718
5	924,9154	7,4980	0,1178	3,7211
6	1139,6985	9,0078	0,1451	4,4704
7	1378,6743	10,5177	0,1755	5,2197
8	1643,9700	12,0275	0,2093	5,9690
9	1935,0683	13,5369	0,2464	6,7181
10	2226,0779	11,2500	0,2834	5,5831

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
2239,0983	14,9976	0,2851	7,4430

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,1661

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 735g Wachs mit 315g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 10% #68	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	146,6	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1150	0,9988	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	47,1044	0,0004	0,0060	0,0003
1	3179,8251	0,9964	0,4049	0,6797
2	8572,3050	1,7131	1,0915	1,1686
3	12664,2823	2,4299	1,6125	1,6575
4	15684,3879	3,1467	1,9970	2,1464
5	17982,5769	3,8639	2,2896	2,6357
6	20345,8271	4,8619	2,5905	3,3164
7	22761,0610	6,3110	2,8980	4,3049
8	24855,5697	8,1625	3,1647	5,5679
9	26850,6471	10,8489	3,4187	7,4003
10	28588,8772	8,8235	3,6400	6,0188

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
28688,0806	14,9934	3,6527	10,2274

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0547

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 1035g Wachs mit 115g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 10% #69	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	145,2	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1150	1,0084	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	45,0165	0,0004	0,0057	0,0003
1	4065,4045	0,9270	0,5176	0,6384
2	9794,3678	1,6558	1,2471	1,1404
3	14216,0711	2,3847	1,8100	1,6423
4	17488,6982	3,1135	2,2267	2,1443
5	19966,8984	3,8423	2,5423	2,6462
6	22165,9070	4,7051	2,8223	3,2404
7	24746,1740	6,1451	3,1508	4,2322
8	26881,9073	7,9492	3,4227	5,4747
9	28923,5482	10,6665	3,6827	7,3461
10	30656,2902	8,8235	3,9033	6,0768

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
30766,4245	14,9936	3,9173	10,3262

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,3315

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 1035g Wachs mit 115g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 10% #70	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	145,2	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1150	1,0084	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	33,3103	0,0005	0,0042	0,0003
1	3667,5089	0,8800	0,4670	0,6061
2	8931,3155	1,6201	1,1372	1,1158
3	13454,2967	2,3602	1,7131	1,6255
4	16803,3165	3,1002	2,1395	2,1351
5	19315,7909	3,8403	2,4594	2,6448
6	21594,1997	4,7303	2,7495	3,2577
7	24232,4570	6,1919	3,0854	4,2644
8	26417,6271	8,0088	3,3636	5,5157
9	28500,7141	10,7068	3,6288	7,3738
10	30296,9749	8,3334	3,8575	5,7392

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
30397,0478	14,9908	3,8703	10,3242

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,2610

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 1035g Wachs mit 115g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 20% #71	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	144,9	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1200	1,0544	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	43,7389	0,0004	0,0056	0,0003
1	2896,6249	1,0542	0,3688	0,7276
2	8686,6174	1,8124	1,1060	1,2508
3	13179,9935	2,5705	1,6781	1,7740
4	16452,7387	3,3286	2,0948	2,2972
5	18896,3572	4,0884	2,4060	2,8216
6	21371,1832	5,1151	2,7211	3,5301
7	24045,9208	6,6316	3,0616	4,5766
8	26255,7894	8,3719	3,3430	5,7777
9	28420,1145	10,8980	3,6186	7,5210
10	30281,8159	8,3334	3,8556	5,7511

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
30388,9194	14,9916	3,8692	10,3462

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,1694

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 960g Wachs mit 240g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 20% #72	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	145,7	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1200	1,0487	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	42,7850	0,0006	0,0054	0,0004
1	2678,2586	1,1716	0,3410	0,8041
2	7592,7799	1,9512	0,9667	1,3392
3	12006,0421	2,7308	1,5287	1,8743
4	15354,3061	3,5104	1,9550	2,4093
5	17897,7201	4,2900	2,2788	2,9444
6	20282,0501	5,2327	2,5824	3,5914
7	23159,5045	6,7637	2,9488	4,6422
8	25469,5788	8,4797	3,2429	5,8200
9	27718,4829	10,9733	3,5292	7,5314
10	29646,0646	8,6842	3,7747	5,9604

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
29754,9887	14,9915	3,7885	10,2893

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0477

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 960g Wachs mit 240g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 20% #73	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	143,5	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1200	1,0647	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	33,9314	0,0005	0,0043	0,0004
1	3653,9964	1,0564	0,4652	0,7361
2	9461,1288	1,8196	1,2046	1,2680
3	14314,4462	2,5828	1,8226	1,7999
4	17974,4597	3,3460	2,2886	2,3317
5	20695,0903	4,1093	2,6350	2,8636
6	22928,9816	4,9307	2,9194	3,4361
7	25756,1932	6,3631	3,2794	4,4342
8	28046,9511	8,0433	3,5710	5,6051
9	30230,6178	10,5716	3,8491	7,3669
10	32049,6350	8,3334	4,0807	5,8072

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
32162,0052	14,9906	4,0950	10,4464

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,4329

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 960g Wachs mit 240g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 30% #74	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	149,6	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1300	1,1064	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,2954	0,0008	0,0041	0,0005
1	2621,1709	1,6152	0,3337	1,0797
2	6987,1873	2,4313	0,8896	1,6252
3	10990,6074	3,2475	1,3994	2,1708
4	14272,0189	4,0636	1,8172	2,7163
5	17027,4378	4,8798	2,1680	3,2619
6	19392,2316	5,7123	2,4691	3,8184
7	22261,1641	6,9811	2,8344	4,6665
8	24957,8523	8,6427	3,1777	5,7772
9	27321,8317	10,9222	3,4787	7,3010
10	29361,7658	8,2500	3,7385	5,5147

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
29479,3072	14,9900	3,7534	10,0201

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,9496

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 910g Wachs mit 390g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 30% #75	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	151,2	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1300	1,0947	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	30,5517	0,0009	0,0039	0,0006
1	2586,4671	1,6436	0,3293	1,0870
2	6374,0976	2,4609	0,8116	1,6276
3	10020,6538	3,2782	1,2759	2,1681
4	13018,9644	4,0954	1,6576	2,7086
5	15560,2631	4,9131	1,9812	3,2494
6	17859,7100	5,7772	2,2740	3,8209
7	20942,6297	7,2034	2,6665	4,7641
8	23585,3426	8,8715	3,0030	5,8674
9	25967,9262	11,1646	3,3063	7,3840
10	28032,6154	8,2500	3,5692	5,4564

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
28143,9527	14,9908	3,5834	9,9146

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,7454

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen: 910g Wachs mit 390g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Gesteinsmehl 30% #76	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	150,1	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1300	1,1027	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	42,7886	0,0007	0,0054	0,0005
1	2623,6606	1,6038	0,3341	1,0685
2	6966,3925	2,4118	0,8870	1,6068
3	10963,6415	3,2198	1,3959	2,1451
4	14175,0158	4,0278	1,8048	2,6834
5	16839,7729	4,8358	2,1441	3,2217
6	19158,4541	5,6744	2,4393	3,7804
7	22094,2020	7,0095	2,8131	4,6699
8	24709,0479	8,6638	3,1461	5,7720
9	27055,3129	10,9758	3,4448	7,3123
10	29072,8792	8,6842	3,7017	5,7856

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
29184,4912	14,9869	3,7159	9,9846

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,9240

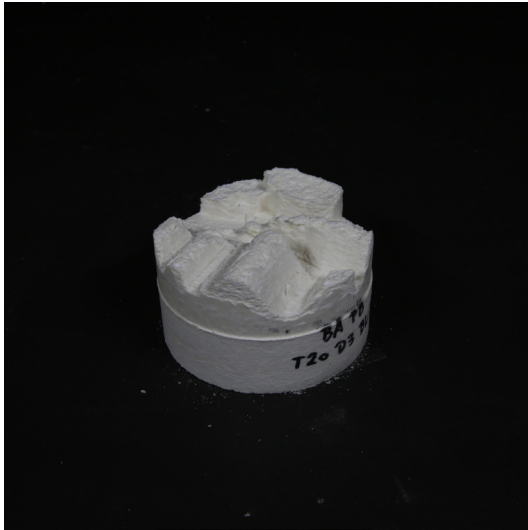
Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

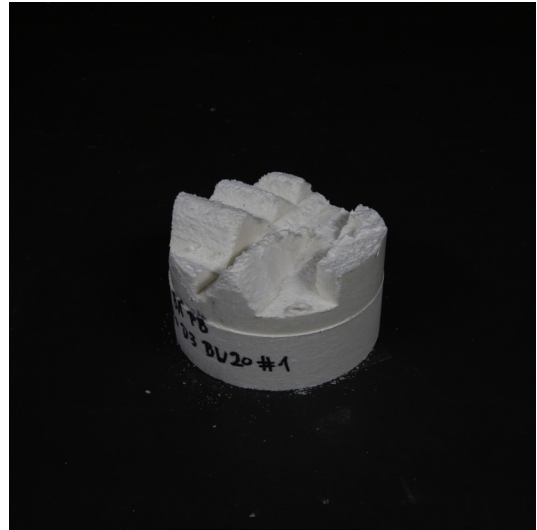
zusätzliche Anmerkungen: 910g Wachs mit 390g Gesteinsmehl

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

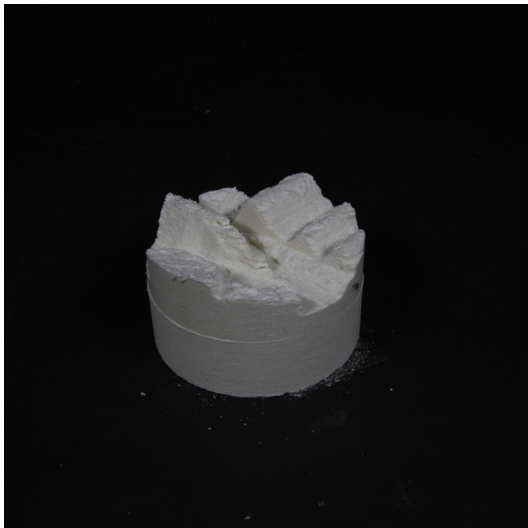
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



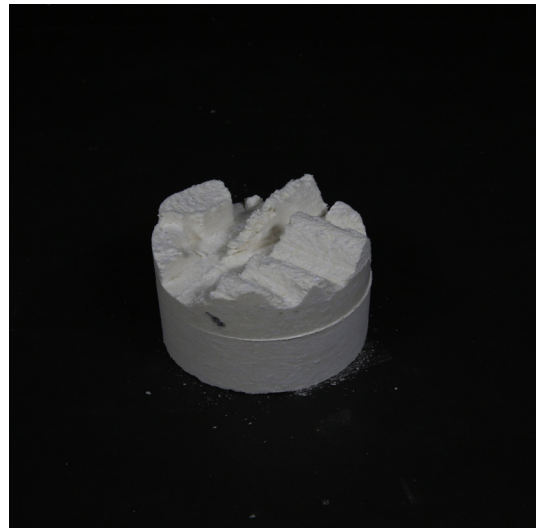
Fräsen T20 D3 BW20 #1



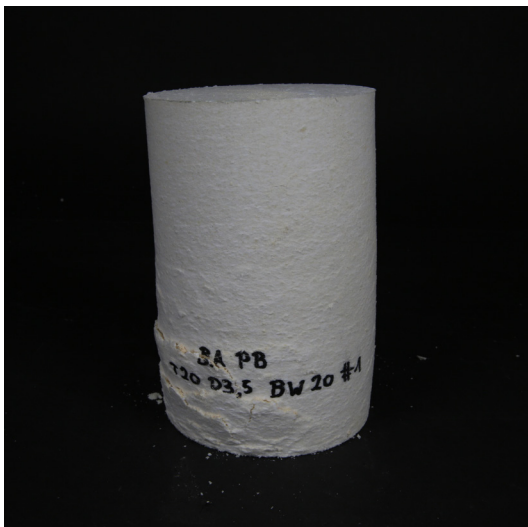
Fräsen T20 D3 BW20 #2



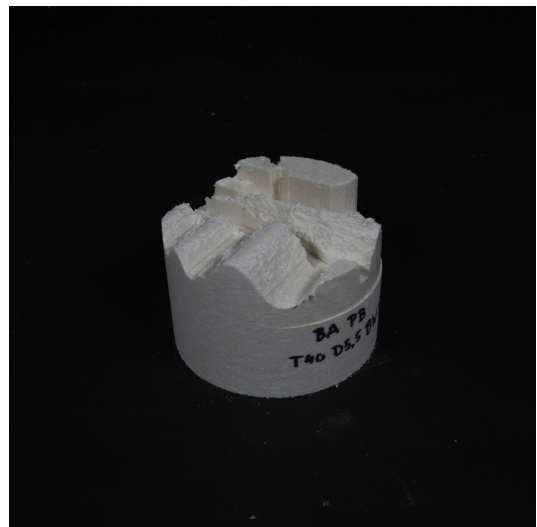
Fräsen T20 D3 BW20 #3



Fräsen T20 D3 BW20 #4



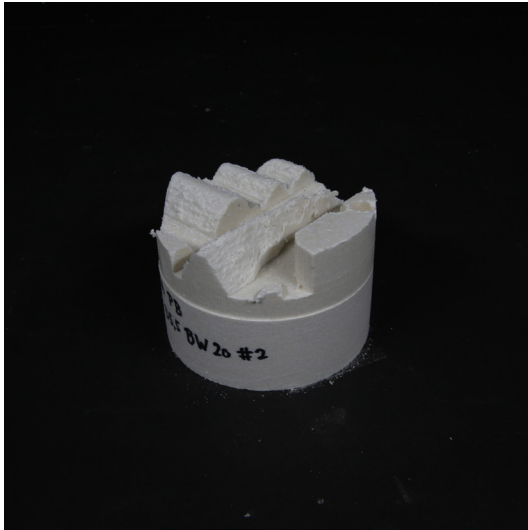
T20 D3,5 BW20



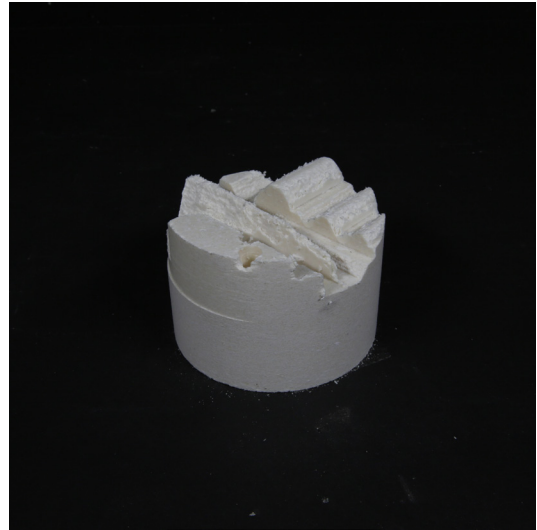
Fräsen T40 D5,5 BW20 #1

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

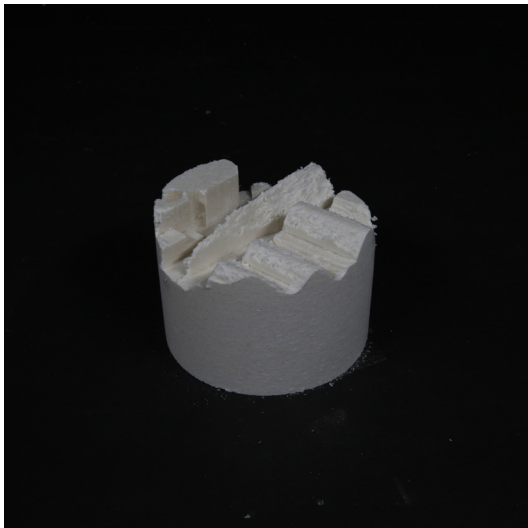
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



Fräsen T40 D5,5 BW20 #2



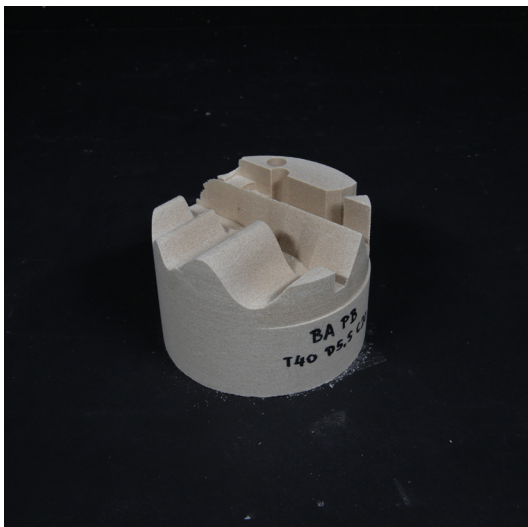
Fräsen T40 D5,5 BW20 #3



Fräsen T40 D5,5 BW20 #4



T40 D5,5 BW20



Fräsen T40 D5,5 C20 #1



Fräsen T40 D5,5 C20 #2

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



Fräsen T40 D5,5 C20 #3



Fräsen T40 D5,5 C20 #4



T40 D5,5 C10



T40 D5,5 C20



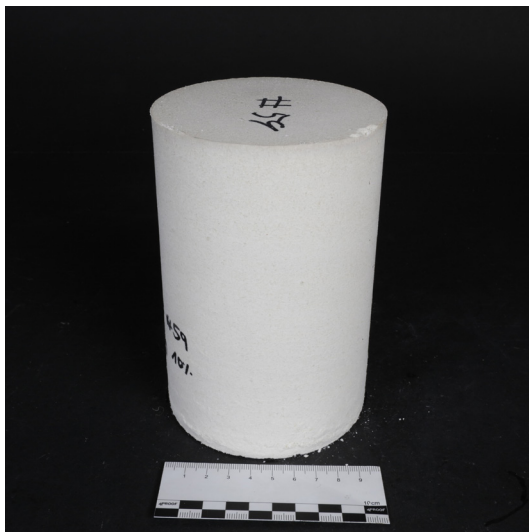
T40 D5,5 C30



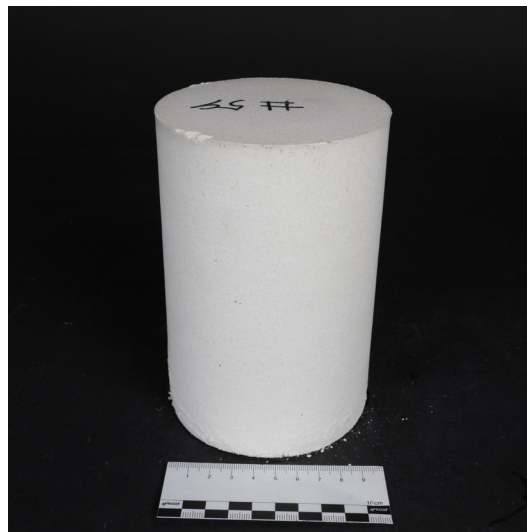
T20 D3 Gesteinsmehl 10% #59.1

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

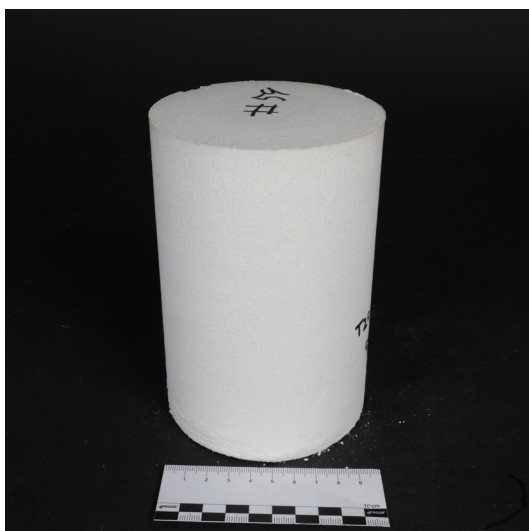
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



T20 D3 Gesteinsmehl 10% #59.2



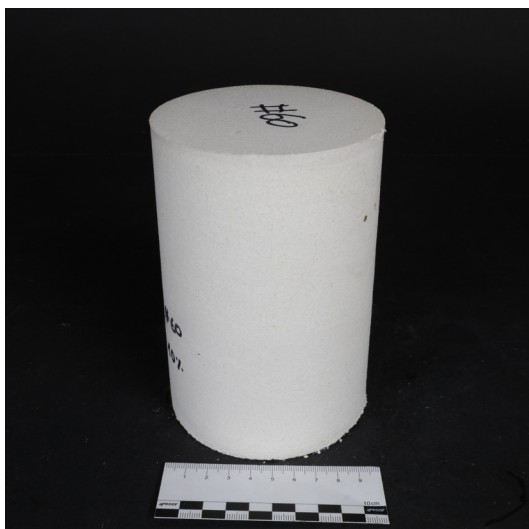
T20 D3 Gesteinsmehl 10% #59.3



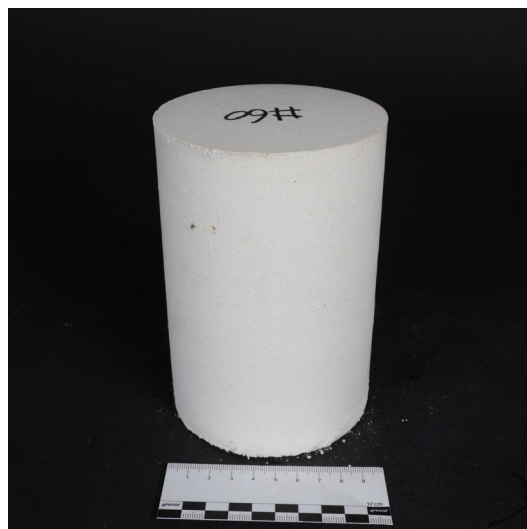
T20 D3 Gesteinsmehl 10% #59.4



T20 D3 Gesteinsmehl 10% #60.1



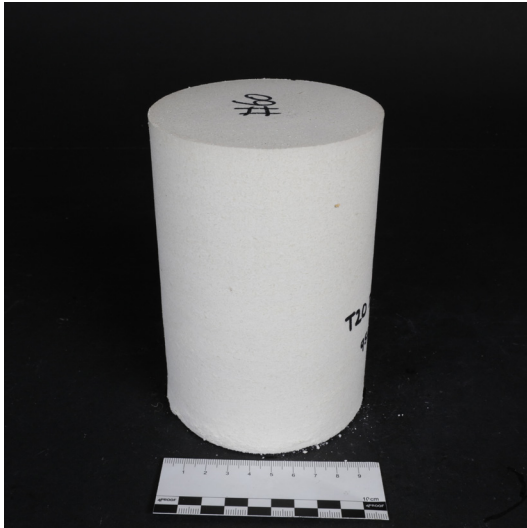
T20 D3 Gesteinsmehl 10% #60.2



T20 D3 Gesteinsmehl 10% #60.3

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

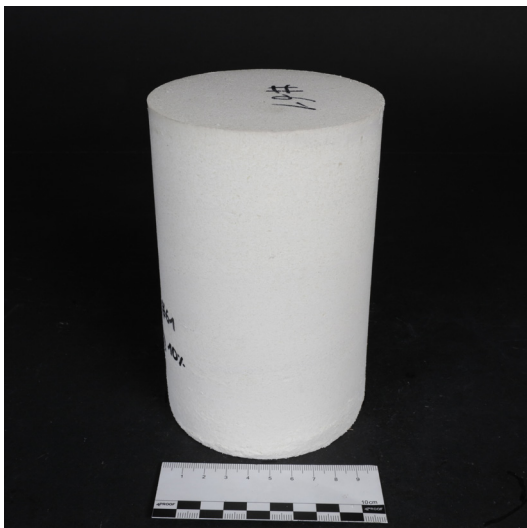
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



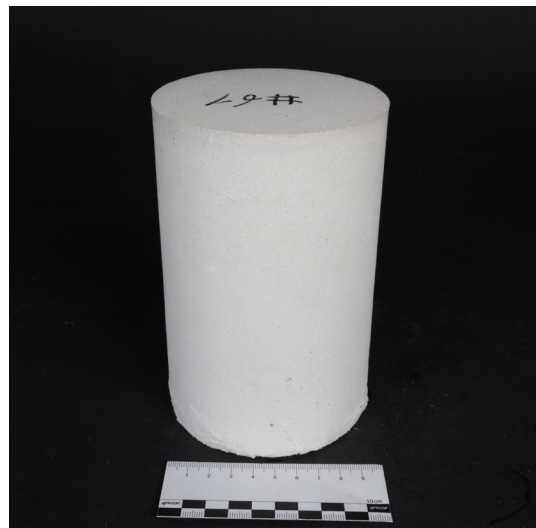
T20 D3 Gesteinsmehl 10% #60.4



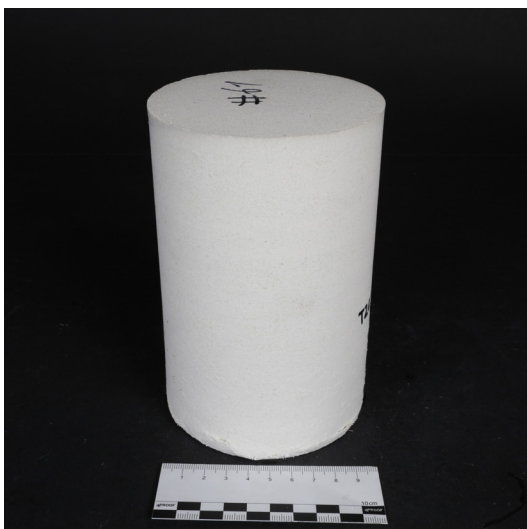
T20 D3 Gesteinsmehl 10% #61.1



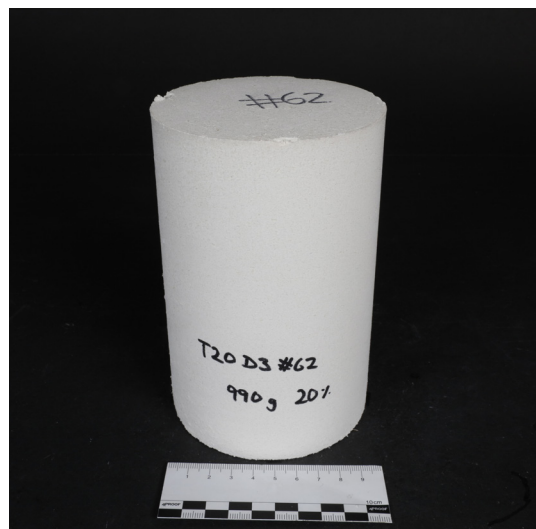
T20 D3 Gesteinsmehl 10% #61.2



T20 D3 Gesteinsmehl 10% #61.3



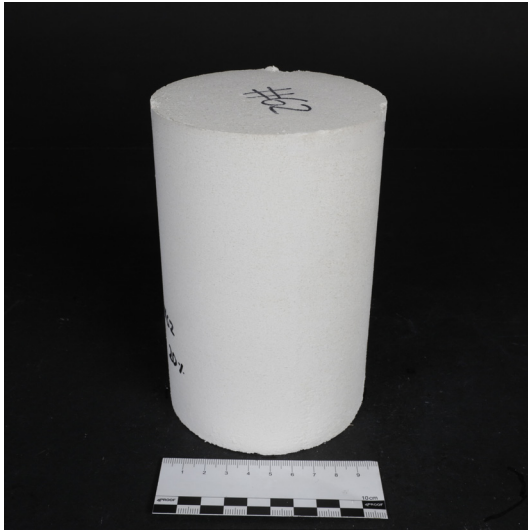
T20 D3 Gesteinsmehl 10% #61.4



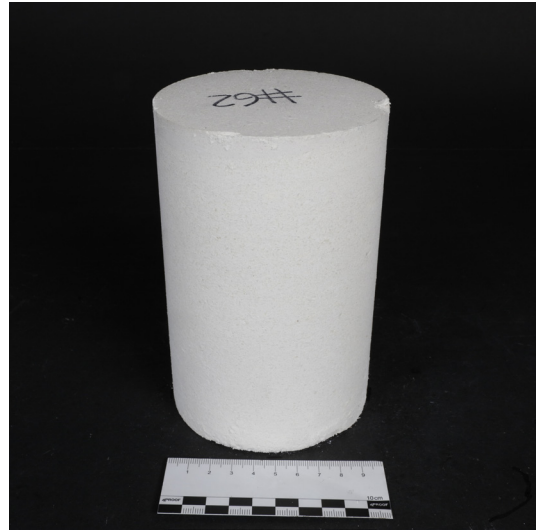
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #62.1

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

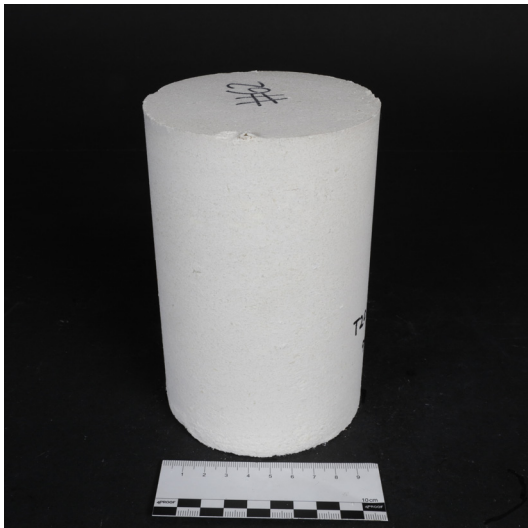
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



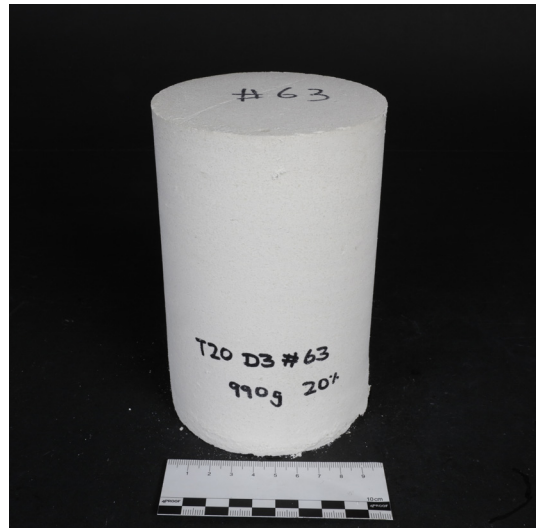
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #62.2



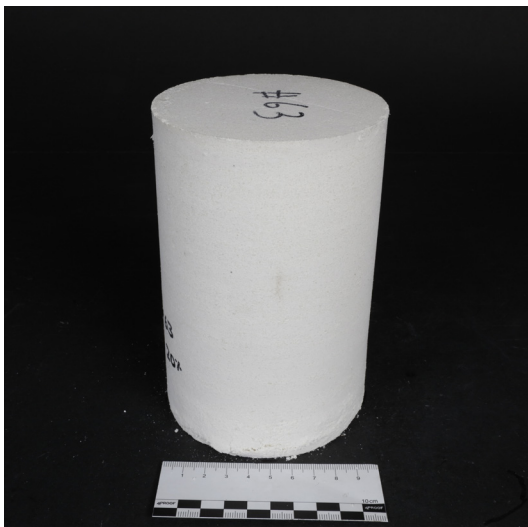
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #62.3



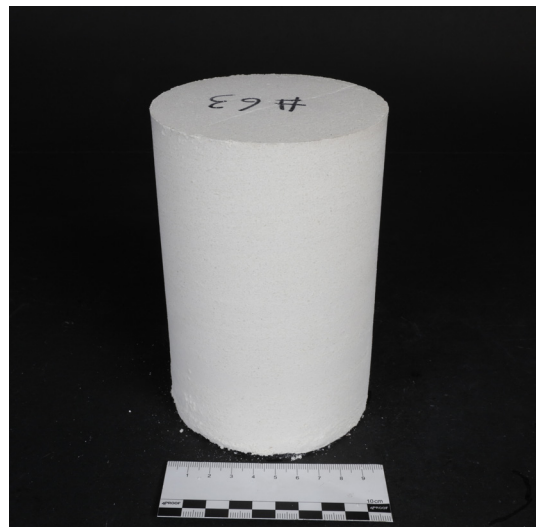
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #62.4



T20 D3 Gesteinsmehl 20% #63.1



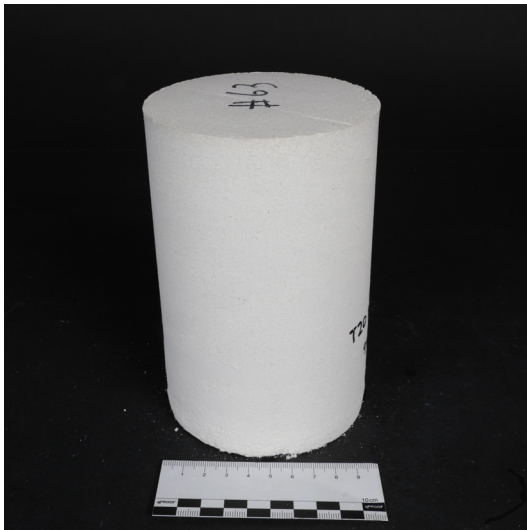
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #63.2



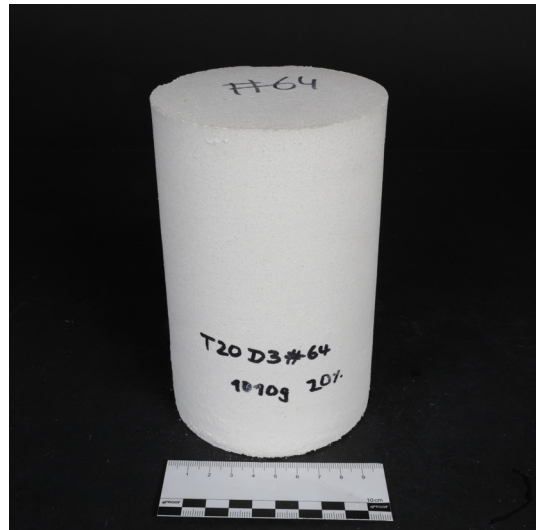
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #63.3

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

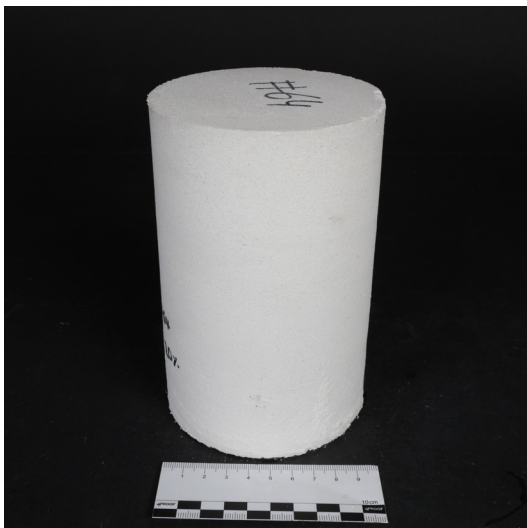
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



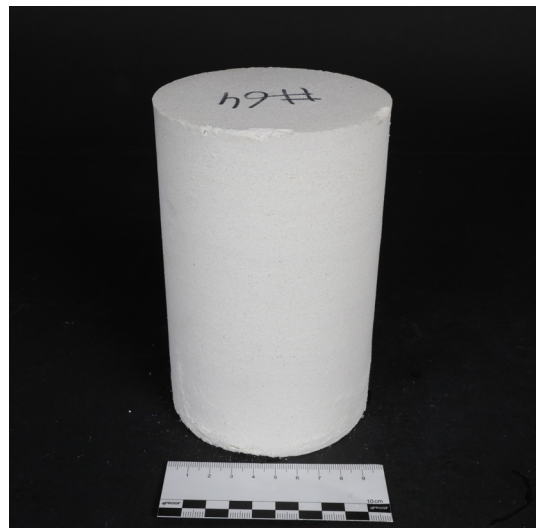
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #63.4



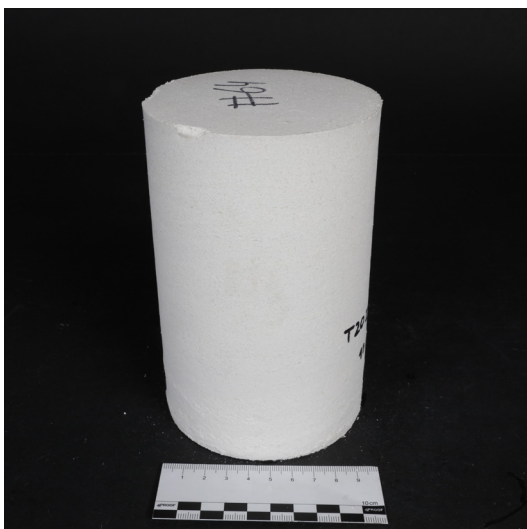
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #64.1



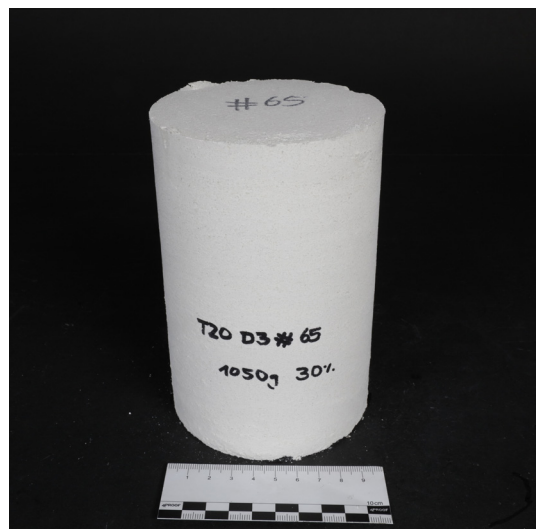
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #64.2



T20 D3 Gesteinsmehl 20% #64.3



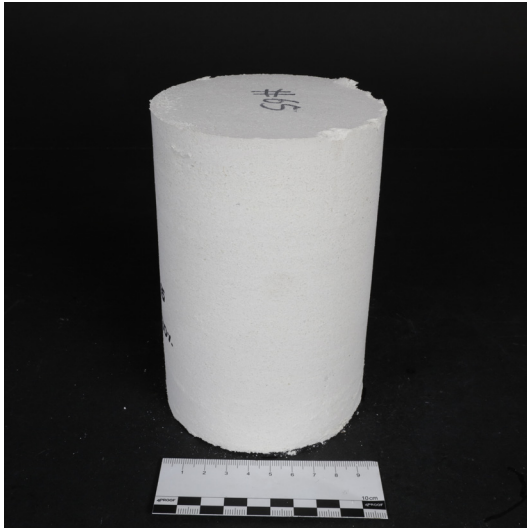
T20 D3 Gesteinsmehl 20% #64.4



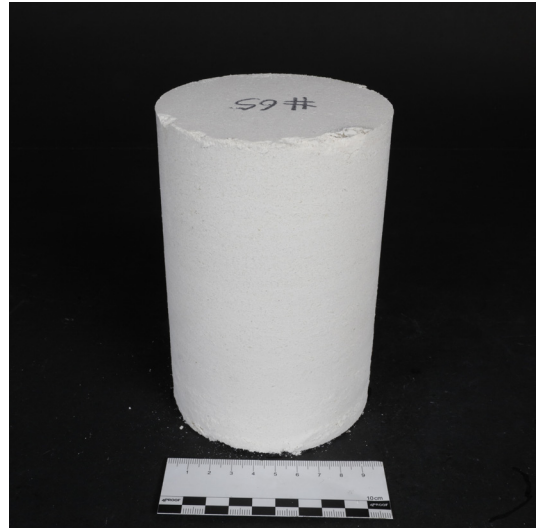
T20 D3 Gesteinsmehl 30% #65.1

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

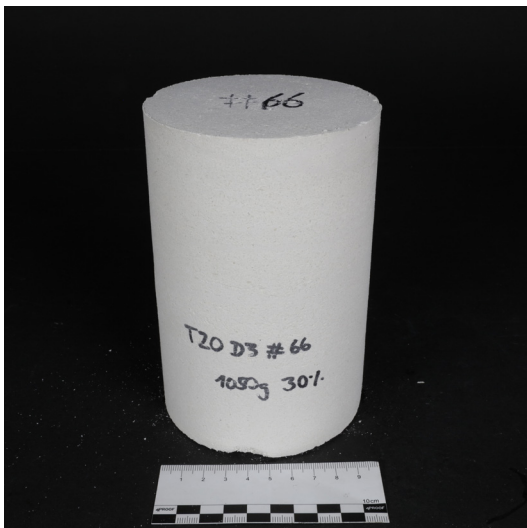
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



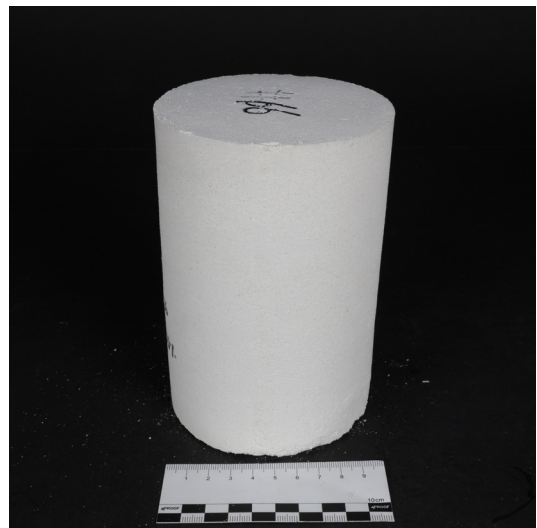
T20 D3 Gesteinsmehl 30% #65.2



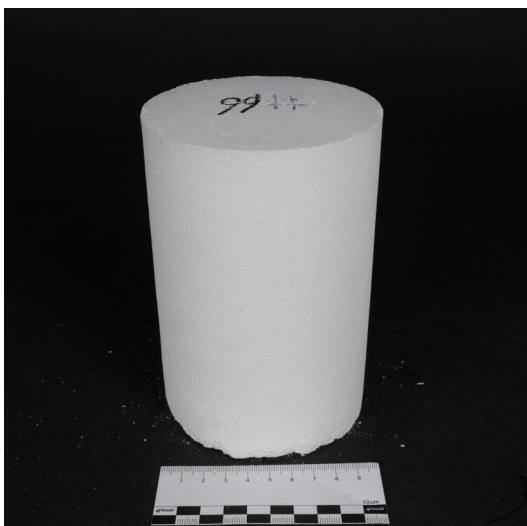
T20 D3 Gesteinsmehl 30% #65.3



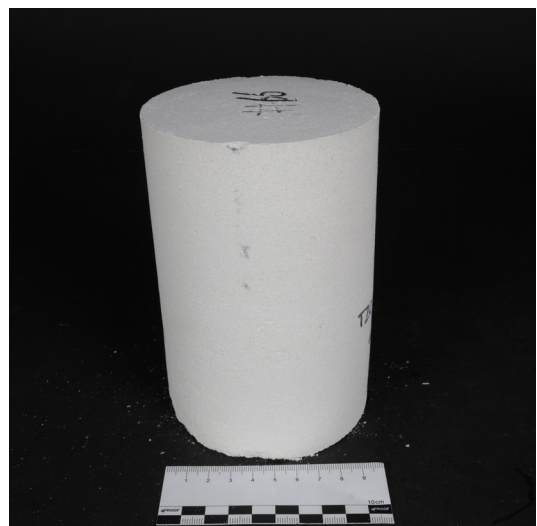
T20 D3 Gesteinsmehl 30% #66.1



T20 D3 Gesteinsmehl 30% #66.2



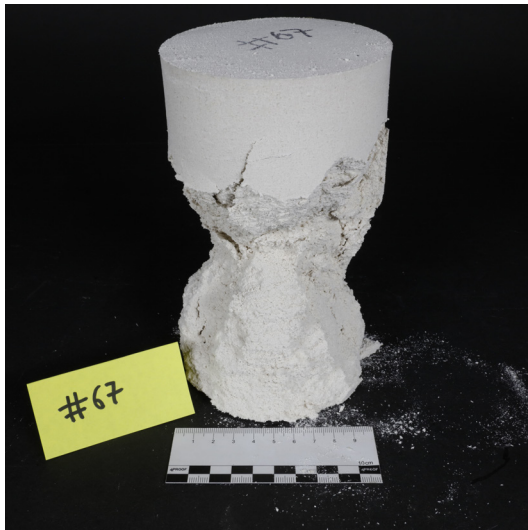
T20 D3 Gesteinsmehl 30% #66.3



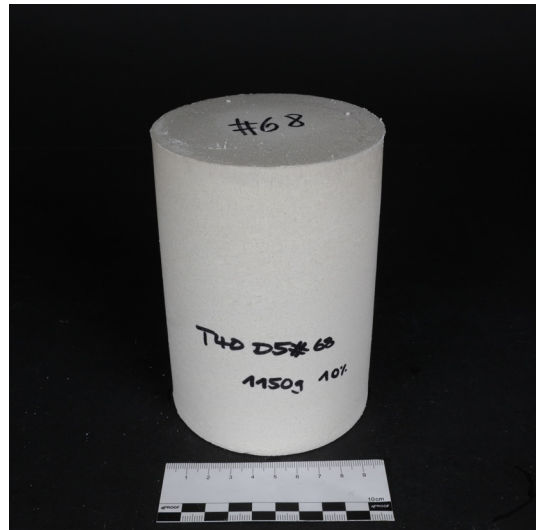
T20 D3 Gesteinsmehl 30% #66.4

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

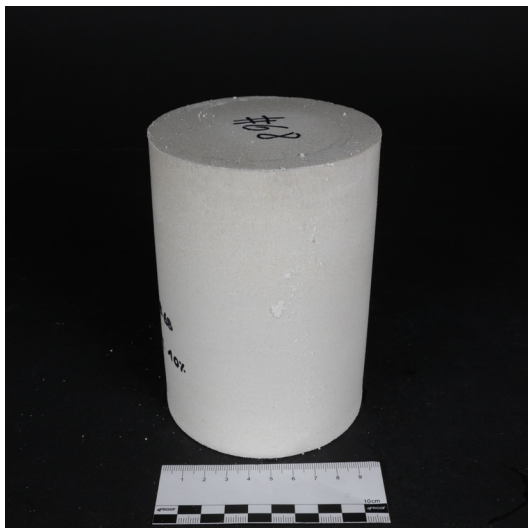
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



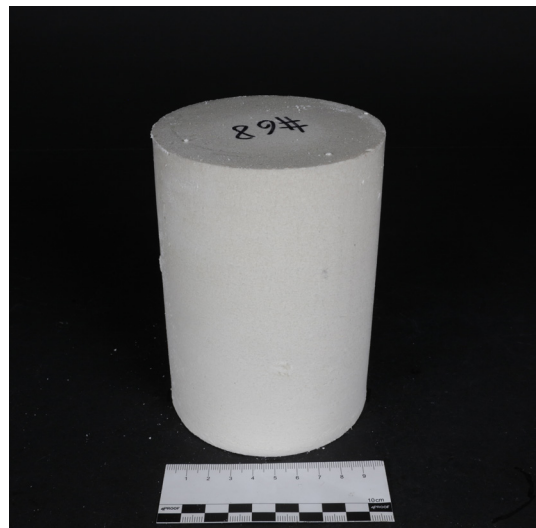
T20 D3 Gesteinsmehl 30% #67 gebrochen



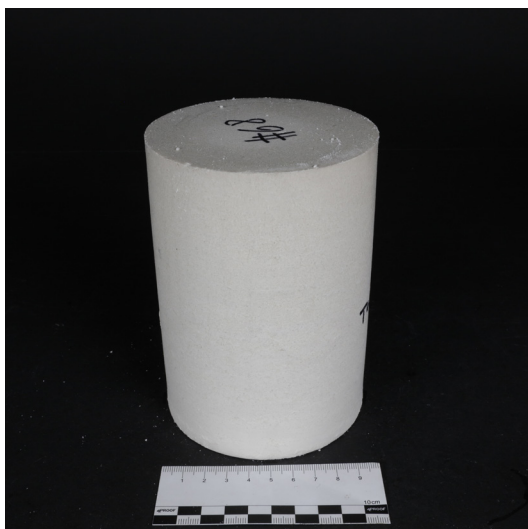
T40 D5 Gesteinsmehl 10% #68.1



T40 D5 Gesteinsmehl 10% #68.2



T40 D5 Gesteinsmehl 10% #68.3



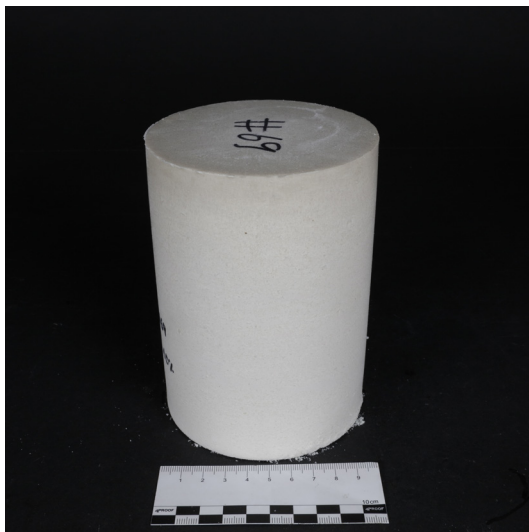
T40 D5 Gesteinsmehl 10% #68.4



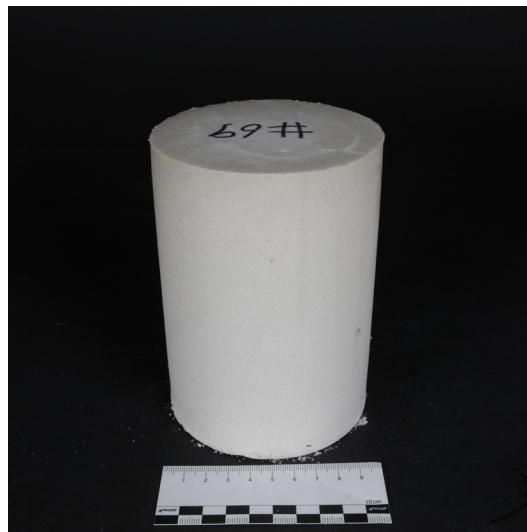
T40 D5 Gesteinsmehl 10% #69.1

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

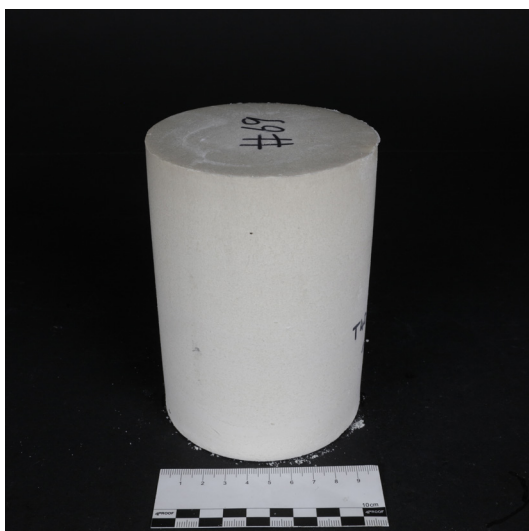
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



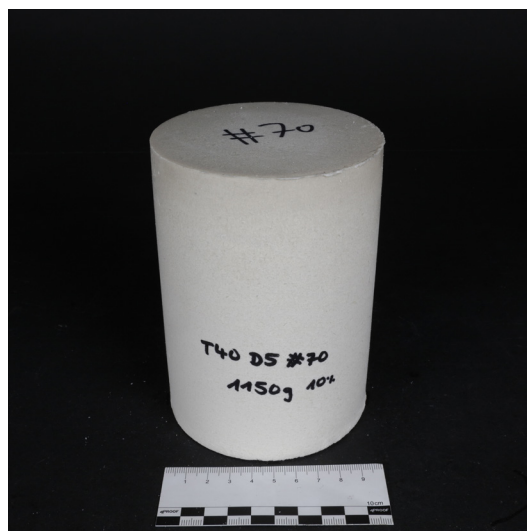
T40 D5 Gesteinsmehl 10% #69.2



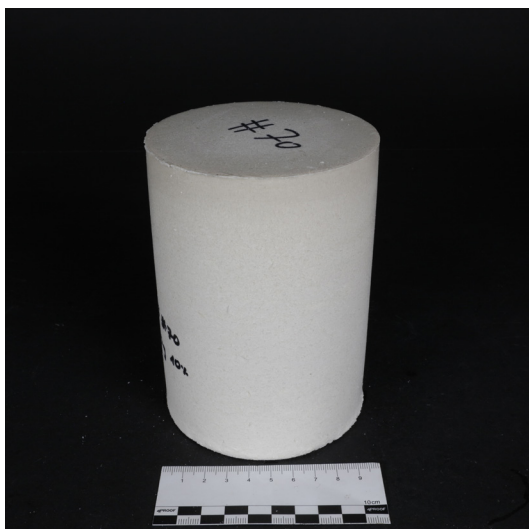
T40 D5 Gesteinsmehl 10% #69.3



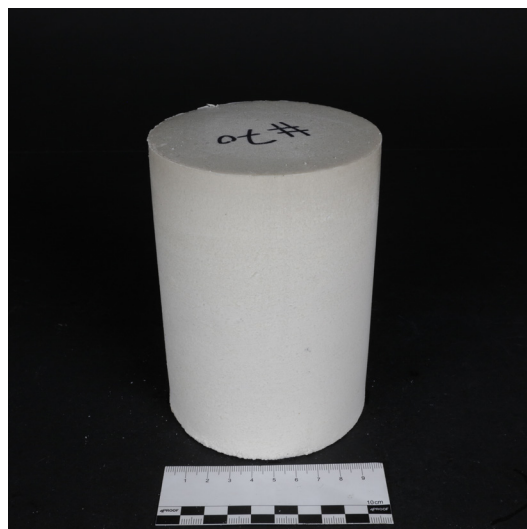
T40 D5 Gesteinsmehl 10% #69.4



T40 D5 Gesteinsmehl 10% #70.1



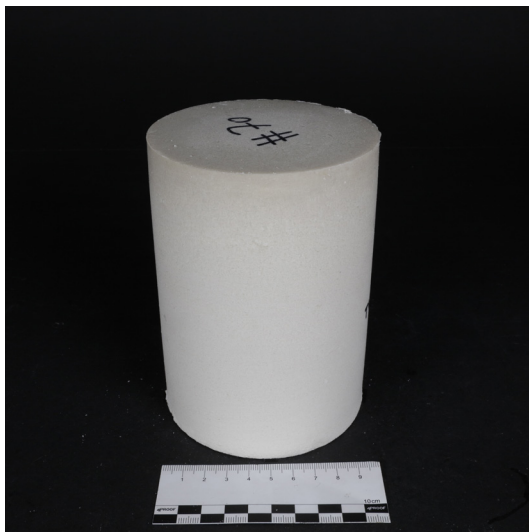
T40 D5 Gesteinsmehl 10% #70.2



T40 D5 Gesteinsmehl 10% #70.3

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

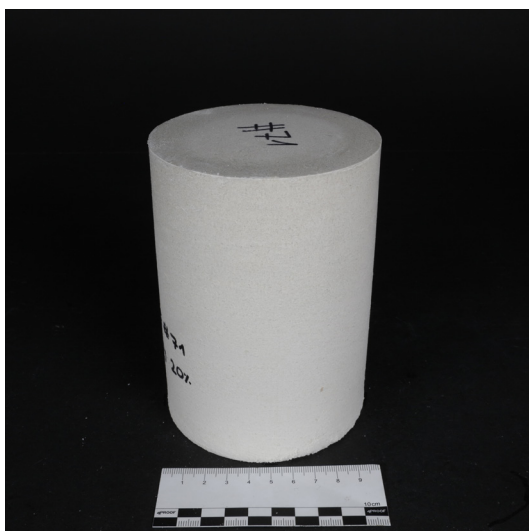
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



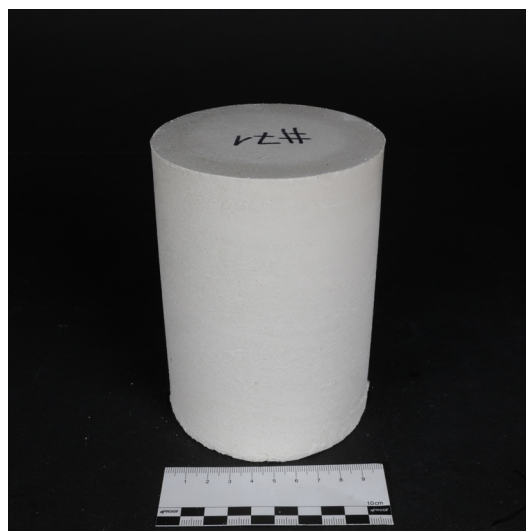
T40 D5 Gesteinsmehl 10% #70.4



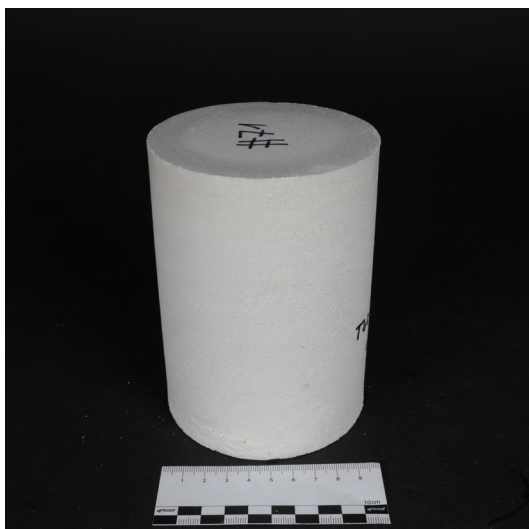
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #71.1



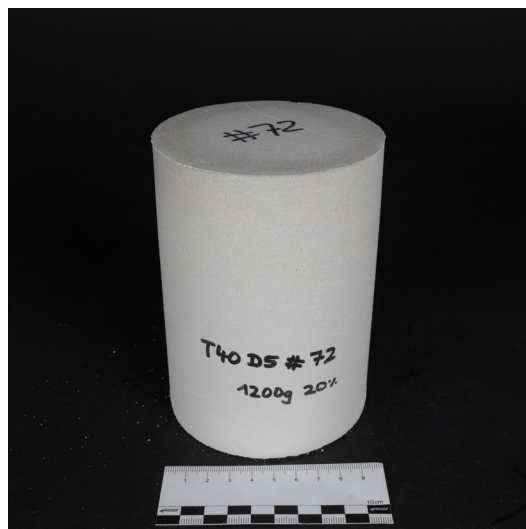
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #71.2



T40 D5 Gesteinsmehl 20% #71.3



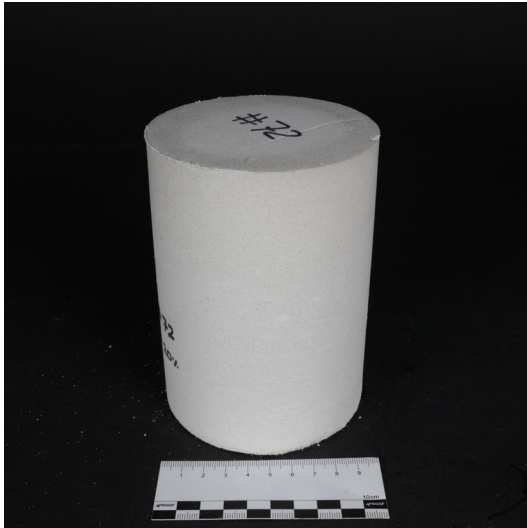
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #71.4



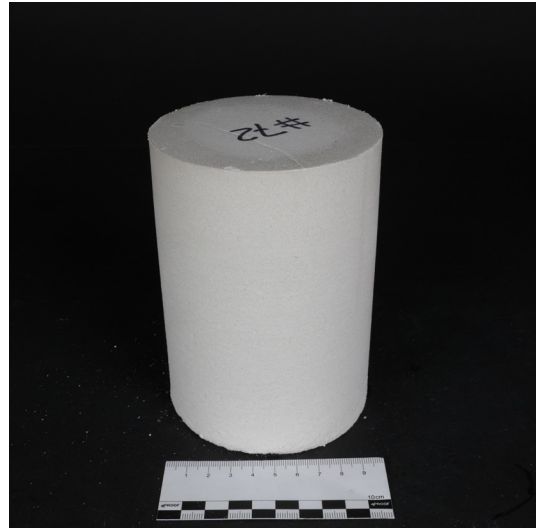
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #72.1

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

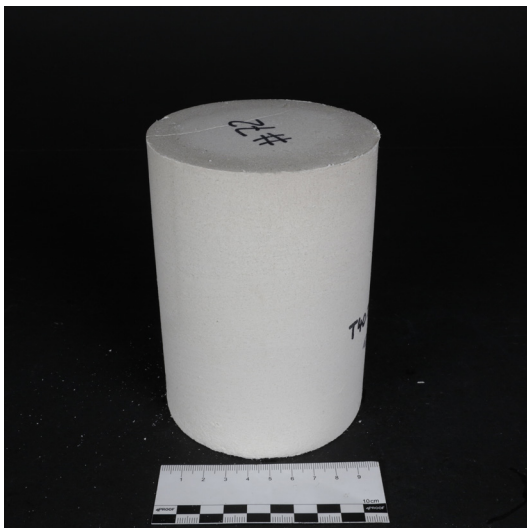
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



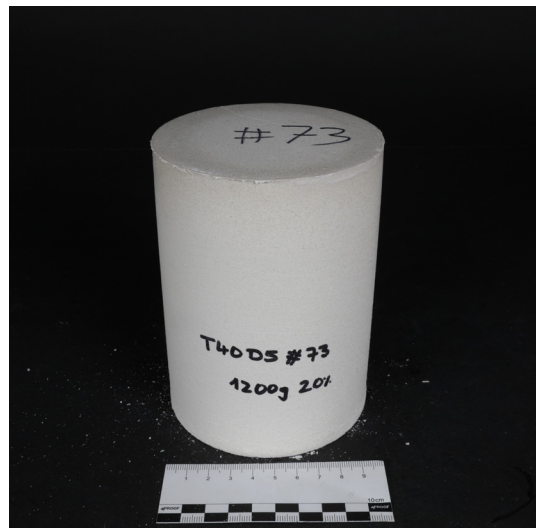
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #72.2



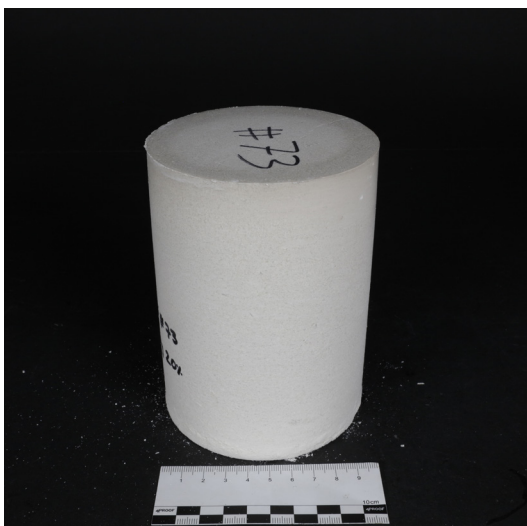
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #72.3



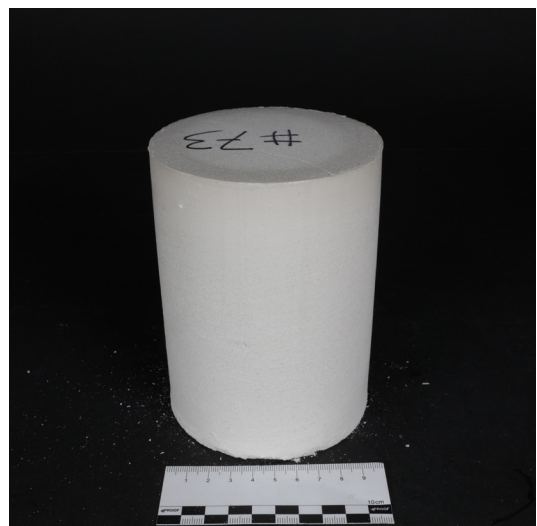
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #72.4



T40 D5 Gesteinsmehl 20% #73.1



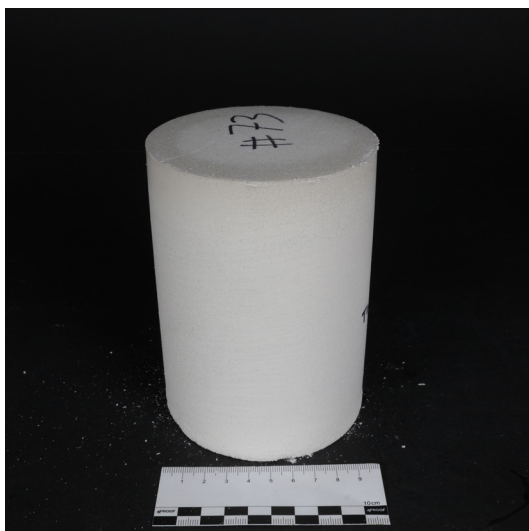
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #73.2



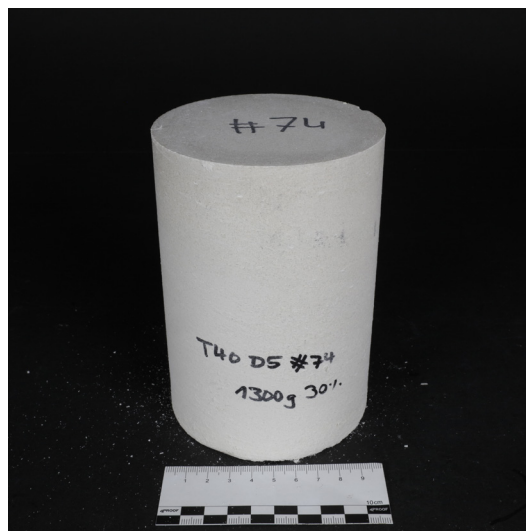
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #73.3

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

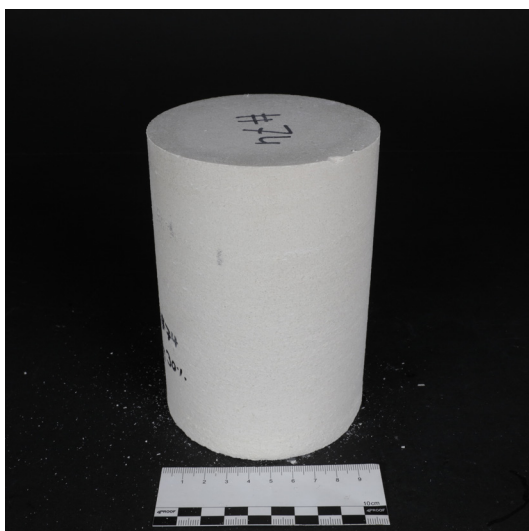
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



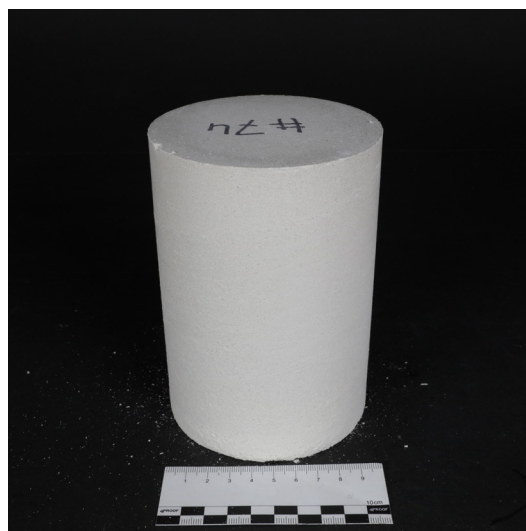
T40 D5 Gesteinsmehl 20% #73.4



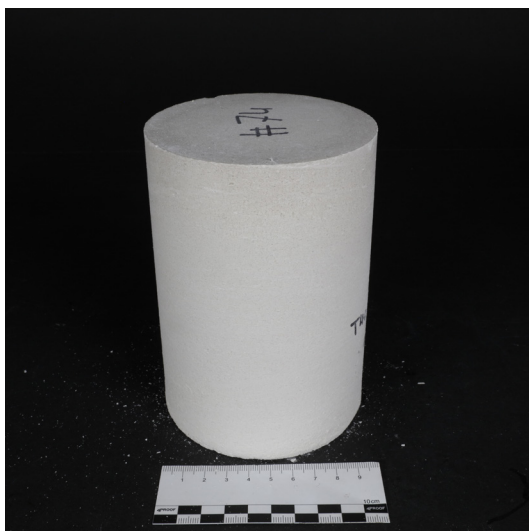
T40 D5 Gesteinsmehl 30% #74.1



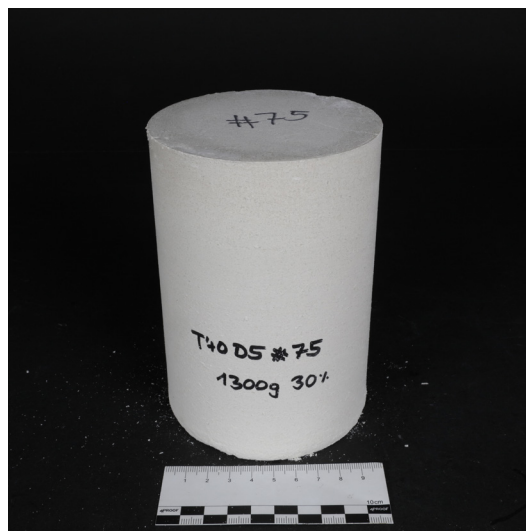
T40 D5 Gesteinsmehl 30% #74.2



T40 D5 Gesteinsmehl 30% #74.3



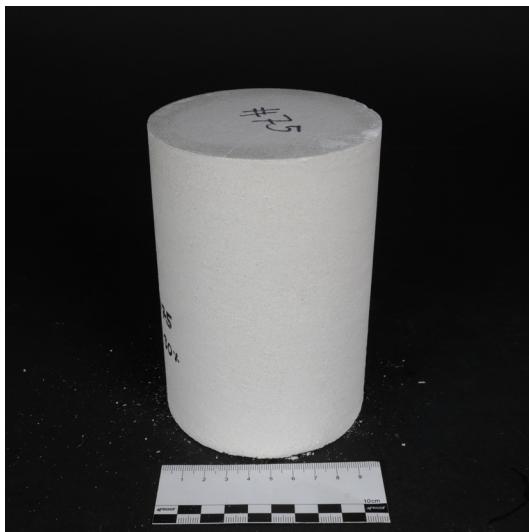
T40 D5 Gesteinsmehl 30% #74.4



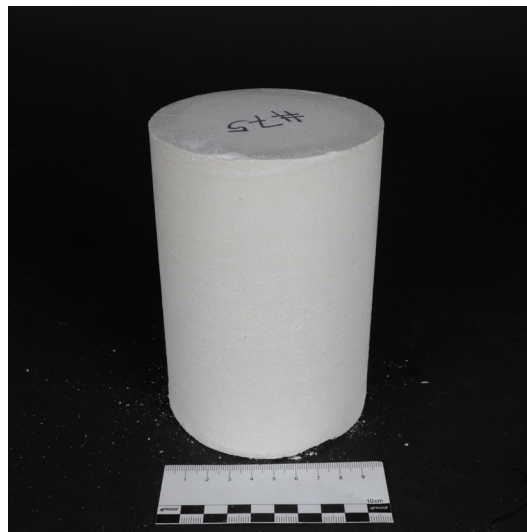
T40 D5 Gesteinsmehl 30% #75.1

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

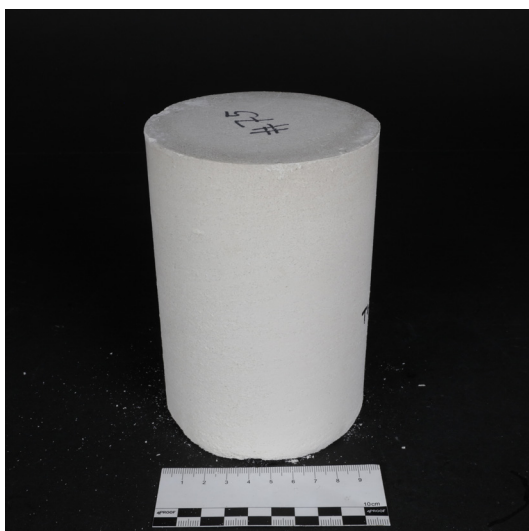
Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



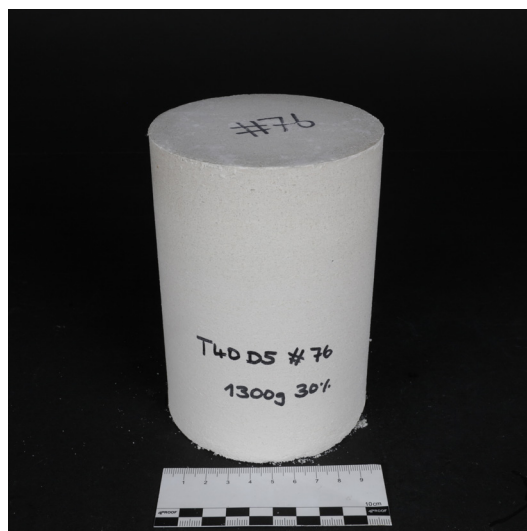
T40 D5 Gesteinsmehl 30% #75.2



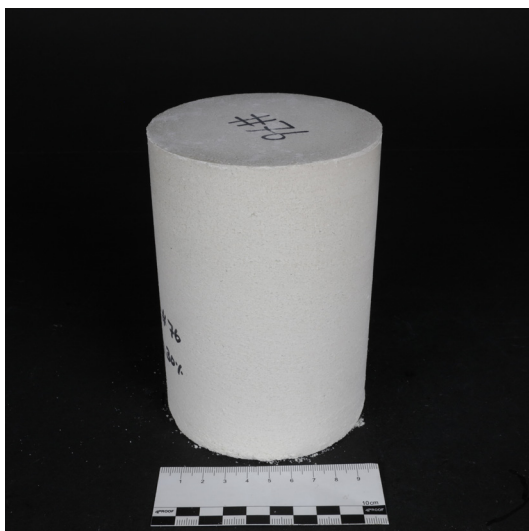
T40 D5 Gesteinsmehl 30% #75.3



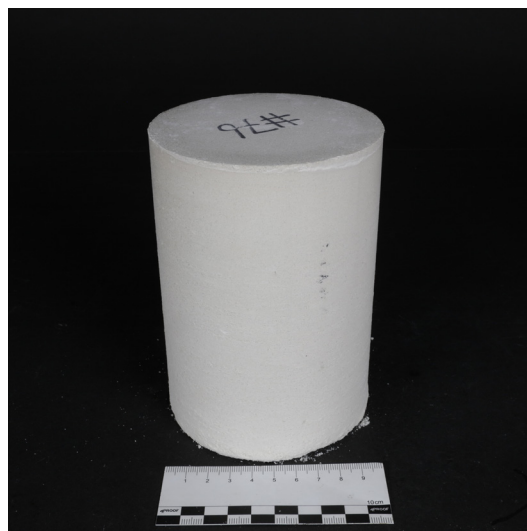
T40 D5 Gesteinsmehl 30% #75.4



T40 D5 Gesteinsmehl 30% #76.1



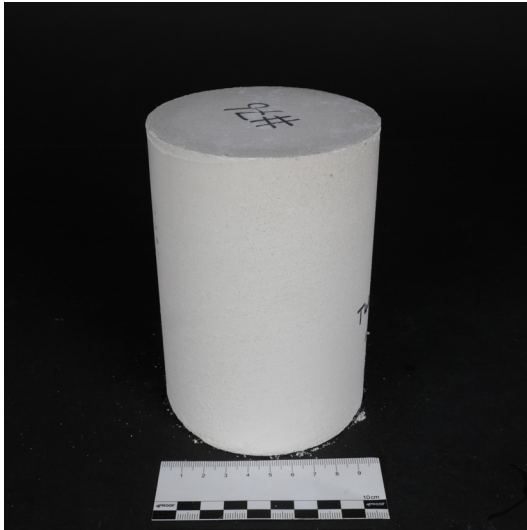
T40 D5 Gesteinsmehl 30% #76.2



T40 D5 Gesteinsmehl 30% #76.3

Anhang H - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.3

Zusatzstoffe im Wachs
Fotos der Prüfkörper



T40 D5 Gesteinsmehl 30% #76.4

Anhang I - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.4

Zusatzstoffe in flüssigem Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3,5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		146,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1500	1,3054	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,3576	0,0000	0,0056	0,0000
1	2590,0608	0,4888	0,3298	0,3341
2	4826,7445	0,8820	0,6146	0,6028
3	6231,0156	1,2751	0,7934	0,8716
4	7446,7042	1,7562	0,9481	1,2004
5	8912,3701	2,5269	1,1348	1,7272
6	10104,6332	3,3610	1,2866	2,2974
7	11241,2686	4,5207	1,4313	3,0900
8	12254,2461	6,7429	1,5603	4,6090
9	12239,6298	10,3788	1,5584	7,0942
10	11225,5803	8,4487	1,4293	5,7749

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
12471,7265	8,4959	1,5879	5,8072

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,5748

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang I - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.4

Zusatzstoffe in flüssigem Wachs
Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Kriechen		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		112,5	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1500	1,6977	

Punkt	Zeit t [s]	Weg L [mm]	Zeit t [%]	Dehnung $\Delta L / \Delta L_{\text{final}}$ [%]	Dehnung $\Delta L / L_0$ [%]
0	1,0154	0,2207	0,0065	26,5903	0,1962
1	990,4712	0,6408	6,3705	77,2031	0,5696
2	1991,4522	0,6743	12,8086	81,2371	0,5994
3	2992,4331	0,6974	19,2466	84,0126	0,6199
4	3993,4141	0,7156	25,6847	86,2119	0,6361
5	4994,3959	0,7309	32,1228	88,0505	0,6497
6	6095,0137	0,7454	39,2017	89,8052	0,6626
7	7229,1585	0,7587	46,4963	91,4050	0,6744
8	8480,2252	0,7719	54,5428	92,9920	0,6861
9	10026,8175	0,7865	64,4902	94,7505	0,6991
10	15547,8272	0,8301	100,0000	100,0000	0,7378

Weg-Zeit-Diagramm

Dehnungs-Zeit-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang I - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.4

Zusatzstoffe in flüssigem Wachs Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		115,7	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1500	1,6507	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	31,5845	0,0003	0,0040	0,0003
1	8934,1124	0,7715	1,1375	0,6668
2	22308,9632	1,4285	2,8405	1,2347
3	30674,3271	2,0855	3,9056	1,8025
4	36363,0733	2,7426	4,6299	2,3704
5	40487,0585	3,3996	5,1550	2,9383
6	43610,4960	4,0566	5,5527	3,5062
7	45995,2244	4,7166	5,8563	4,0766
8	48073,6881	5,4743	6,1209	4,7315
9	47395,4683	6,4629	6,0346	5,5859
10	39404,1770	3,6354	5,0171	3,1421

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
50037,8454	6,4494	6,3710	5,5742

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
6,2088

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 30°C #1		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		150,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8471	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	49,6803	0,0000	0,0063	0,0000
1	403,8715	0,4588	0,0514	0,3053
2	770,3344	0,8765	0,0981	0,5832
3	1140,5478	1,4498	0,1452	0,9646
4	1490,8184	2,2635	0,1898	1,5060
5	1830,1749	3,4166	0,2330	2,2732
6	2116,9078	4,7492	0,2695	3,1598
7	2324,8984	6,0880	0,2960	4,0506
8	2445,1089	7,4268	0,3113	4,9413
9	2452,9309	8,7657	0,3123	5,8321
10	2341,1558	10,1044	0,2981	6,7228

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
2463,8365	8,1498	0,3137	5,4224

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,3118

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 30°C #29	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	140	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,9095	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,7808	0,0000	0,0052	0,0000
1	666,9633	0,6030	0,0849	0,4307
2	1319,8884	1,2226	0,1681	0,8733
3	1899,1230	1,9745	0,2418	1,4104
4	2458,2217	3,0742	0,3130	2,1959
5	2999,8886	4,6790	0,3820	3,3422
6	3511,9902	6,6646	0,4472	4,7605
7	3970,1963	8,7464	0,5055	6,2474
8	4355,4737	10,8422	0,5546	7,7444
9	4634,6833	12,9435	0,5901	9,2454
10	4757,9927	12,0000	0,6058	8,5714

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4778,8154	14,9817	0,6085	10,7012

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4570

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 30°C #30	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	152,2	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8366	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	55,1435	0,0000	0,0070	0,0000
1	630,5710	0,4484	0,0803	0,2946
2	1252,5489	1,0040	0,1595	0,6597
3	1840,5960	1,7716	0,2344	1,1640
4	2407,8278	2,8793	0,3066	1,8918
5	2957,7362	4,4917	0,3766	2,9512
6	3472,6657	6,5179	0,4422	4,2825
7	3925,1406	8,6438	0,4998	5,6792
8	4308,2427	10,7751	0,5485	7,0796
9	4604,6993	12,9102	0,5863	8,4824
10	4769,6584	12,0000	0,6073	7,8844

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4788,5166	14,9812	0,6097	9,8431

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4725

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 40°C #31	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	155,7	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8178	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	51,3675	0,0000	0,0065	0,0000
1	679,0193	0,5723	0,0865	0,3676
2	1349,3371	1,1945	0,1718	0,7672
3	1936,5403	1,9326	0,2466	1,2412
4	2505,6421	2,9874	0,3190	1,9187
5	3055,9507	4,5340	0,3891	2,9120
6	3575,7347	6,5383	0,4553	4,1993
7	4029,3506	8,6580	0,5130	5,5607
8	4421,0211	10,7860	0,5629	6,9274
9	4741,6276	12,9148	0,6037	8,2947
10	4960,5394	12,0000	0,6316	7,7071

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
4976,0655	14,9976	0,6336	9,6324

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4898

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 40°C #32	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	155	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8214	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	42,5267	0,0000	0,0054	0,0000
1	667,3515	0,6905	0,0850	0,4455
2	1350,8118	1,2805	0,1720	0,8261
3	1980,5427	1,9762	0,2522	1,2750
4	2589,8763	2,9514	0,3298	1,9041
5	3172,7560	4,3479	0,4040	2,8051
6	3740,3979	6,2251	0,4762	4,0162
7	4263,5430	8,3705	0,5429	5,4003
8	4724,1556	10,5894	0,6015	6,8319
9	5107,0620	12,8162	0,6503	8,2685
10	5379,5171	12,0000	0,6849	7,7419

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5398,5080	14,9971	0,6874	9,6755

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,5241

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 40°C #33	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	153,6	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8289	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	41,2629	0,0000	0,0053	0,0000
1	663,6919	0,6816	0,0845	0,4438
2	1342,0746	1,2993	0,1709	0,8459
3	1933,2906	2,0175	0,2462	1,3135
4	2507,6589	3,0419	0,3193	1,9804
5	3061,4366	4,5398	0,3898	2,9556
6	3591,4499	6,5114	0,4573	4,2392
7	4063,2557	8,6260	0,5173	5,6159
8	4475,9293	10,7627	0,5699	7,0070
9	4825,7278	12,9028	0,6144	8,4003
10	5086,3877	12,0000	0,6476	7,8125

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5102,5273	14,9975	0,6497	9,7640

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,4911

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 50°C #34		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		149,7	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8505	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	46,4459	0,0000	0,0059	0,0000
1	1016,5021	0,6374	0,1294	0,4258
2	2287,7399	1,2086	0,2913	0,8073
3	3340,8474	1,7929	0,4254	1,1977
4	4178,7923	2,4113	0,5321	1,6108
5	5034,4039	3,3224	0,6410	2,2194
6	5825,1659	4,6565	0,7417	3,1106
7	6583,7540	6,6708	0,8383	4,4561
8	7288,4738	9,3057	0,9280	6,2163
9	7891,2538	12,1704	1,0047	8,1298
10	8355,0672	10,7143	1,0638	7,1572

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8399,6214	14,9865	1,0695	10,0110

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8683

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 50°C #35	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	146,7	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8679	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,8111	0,0000	0,0049	0,0000
1	1086,5015	0,6472	0,1383	0,4411
2	2032,7957	0,9903	0,2588	0,6750
3	2996,6835	1,3694	0,3815	0,9335
4	4338,0199	2,0532	0,5523	1,3996
5	5343,5055	2,8076	0,6804	1,9139
6	6317,6244	3,9594	0,8044	2,6990
7	7229,6903	5,7876	0,9205	3,9452
8	8101,2872	8,5018	1,0315	5,7953
9	8884,9960	11,7214	1,1313	7,9900
10	9498,7736	14,9750	1,2094	10,2240

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
9543,8244	14,9986	1,2152	10,2240

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9880

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D1 Tempern 50°C #36	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	148,5	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8574	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,7068	0,0000	0,0048	0,0000
1	1070,7869	0,6174	0,1363	0,4158
2	1895,5081	0,9381	0,2413	0,6317
3	3112,2038	1,4875	0,3963	1,0017
4	4154,8206	2,1235	0,5290	1,4299
5	5080,8625	2,9508	0,6469	1,9870
6	5956,7655	4,1950	0,7584	2,8249
7	6788,8140	6,1591	0,8644	4,1475
8	7579,8629	8,8773	0,9651	5,9780
9	8284,4851	11,9293	1,0548	8,0332
10	8836,3920	14,9750	1,1251	10,0000

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8876,4189	14,9751	1,1302	10,0843

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9147

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Tempern 30°C #2		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		161,9	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,7864	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	42,6569	0,0000	0,0054	0,0000
1	975,9684	0,6218	0,1243	0,3841
2	1990,5257	1,1998	0,2534	0,7411
3	2832,8838	1,7795	0,3607	1,0991
4	3695,6509	2,5752	0,4705	1,5906
5	4498,0030	3,6093	0,5727	2,2293
6	5273,0914	4,9519	0,6714	3,0586
7	6036,4690	6,6266	0,7686	4,0930
8	6780,8575	8,7676	0,8634	5,4155
9	7323,3241	11,5496	0,9324	7,1338
10	6985,9498	14,3289	0,8895	8,8505

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7352,8943	12,1854	0,9362	7,5265

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8362

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Tempern 30°C #3		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		156,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8146	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	42,5696	0,0000	0,0054	0,0000
1	919,9596	0,5656	0,1171	0,3618
2	1995,1080	1,0891	0,2540	0,6968
3	2882,0054	1,6126	0,3669	1,0317
4	3626,5987	2,1827	0,4618	1,3965
5	4390,0363	2,9796	0,5590	1,9063
6	5114,0628	4,0149	0,6511	2,5687
7	5813,1527	5,3408	0,7402	3,4170
8	6492,0495	7,1053	0,8266	4,5459
9	6954,2576	9,5993	0,8854	6,1416
10	6613,4403	12,1356	0,8420	7,7643

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
6960,0837	9,8610	0,8862	6,3090

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8519

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Tempern 30°C #4		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		155,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8199	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	64,4319	0,0000	0,0082	0,0000
1	1213,1497	0,5399	0,1545	0,3477
2	2404,0282	1,0899	0,3061	0,7018
3	3305,8730	1,6475	0,4209	1,0608
4	4130,0821	2,3778	0,5259	1,5311
5	4907,6143	3,3390	0,6249	2,1500
6	5661,1347	4,5905	0,7208	2,9559
7	6396,8397	6,1951	0,8145	3,9891
8	7089,7032	8,4408	0,9027	5,4352
9	7131,2167	11,1602	0,9080	7,1862
10	6206,8542	8,4608	0,7903	5,4481

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7289,8199	10,1611	0,9282	6,5429

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8813

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper:		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
T20 D3 Tempern 40°C #5		156,4	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8141	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	40,9179	0,0000	0,0052	0,0000
1	1122,4003	0,5339	0,1429	0,3413
2	2393,9440	1,0806	0,3048	0,6909
3	3651,1656	1,7528	0,4649	1,1207
4	4626,2753	2,4793	0,5890	1,5852
5	5596,7281	3,5286	0,7126	2,2562
6	6519,7591	4,9544	0,8301	3,1677
7	7407,7895	6,7980	0,9432	4,3465
8	8272,5079	9,2807	1,0533	5,9339
9	8700,1023	12,5443	1,1077	8,0206
10	7880,4413	15,2084	1,0034	9,7240

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
8755,1838	12,0825	1,1147	7,7254

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9934

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper:		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
T20 D3 Tempern 40°C		154,2	100	7854
#6		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8257	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,9783	0,0000	0,0047	0,0000
1	1127,4236	0,6878	0,1435	0,4461
2	2058,0596	1,0450	0,2620	0,6777
3	3377,2058	1,6202	0,4300	1,0507
4	4637,1740	2,3314	0,5904	1,5119
5	5673,9621	3,1663	0,7224	2,0534
6	6678,0329	4,3444	0,8503	2,8174
7	7642,8706	5,9346	0,9731	3,8487
8	8575,5328	8,0392	1,0919	5,2135
9	9421,2753	11,0522	1,1996	7,1675
10	9096,3296	13,9333	1,1582	9,0359

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
9574,2526	12,4696	1,2190	8,0867

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,0755

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Tempern 40°C #37		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		142,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8948	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,9738	0,0000	0,0042	0,0000
1	1624,2958	0,7873	0,2068	0,5532
2	3414,3389	1,2608	0,4347	0,8860
3	4874,6430	1,7344	0,6207	1,2188
4	6516,4023	2,4637	0,8297	1,7313
5	7970,3596	3,4318	1,0148	2,4117
6	9353,4392	4,8583	1,1909	3,4142
7	10653,3079	6,7828	1,3564	4,7665
8	11923,6172	9,1461	1,5182	6,4274
9	13174,6226	11,8758	1,6774	8,3456
10	14311,7959	9,5455	1,8222	6,7080

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
14376,4483	14,9836	1,8305	10,5296

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,3809

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Tempern 50°C #38	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	141,1	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,9024	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	52,1338	0,0001	0,0066	0,0001
1	2595,4772	0,6237	0,3305	0,4420
2	5570,4188	1,1450	0,7092	0,8115
3	7843,8056	1,6664	0,9987	1,1810
4	9555,7216	2,1877	1,2167	1,5505
5	11285,5289	2,9115	1,4369	2,0634
6	12974,9087	3,9706	1,6520	2,8140
7	14482,9582	5,5026	1,8440	3,8998
8	15899,3621	7,8613	2,0244	5,5714
9	17260,9733	11,1264	2,1977	7,8855
10	18478,1869	9,2308	2,3527	6,5420

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
18543,3129	14,9712	2,3610	10,6103

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,9711

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Tempern 50°C #39	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	144	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8842	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	50,8491	0,0001	0,0065	0,0000
1	2321,8522	0,5401	0,2956	0,3751
2	4905,4181	1,0515	0,6246	0,7302
3	6988,5146	1,5629	0,8898	1,0854
4	8594,6495	2,0747	1,0943	1,4408
5	10340,3035	2,8367	1,3166	1,9699
6	11932,7807	3,8960	1,5193	2,7056
7	13408,6618	5,4991	1,7072	3,8188
8	14787,1131	7,8973	1,8828	5,4843
9	16119,2960	11,1565	2,0524	7,7476
10	17306,3251	8,7500	2,2035	6,0764

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
17374,2976	14,9767	2,2122	10,4005

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,8380

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Tempern 50°C #40	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	139,4	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,9134	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	51,5303	0,0001	0,0066	0,0001
1	2779,3912	0,7666	0,3539	0,5499
2	6113,4479	1,3076	0,7784	0,9380
3	8583,8265	1,8487	1,0929	1,3261
4	10443,1843	2,3897	1,3297	1,7143
5	12117,3199	3,0451	1,5428	2,1844
6	13988,5554	4,1322	1,7811	2,9643
7	15560,9339	5,6189	1,9813	4,0308
8	17037,5703	7,9101	2,1693	5,6744
9	18457,5284	11,1134	2,3501	7,9723
10	19725,9010	9,2308	2,5116	6,6218

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
19799,6017	14,9660	2,5210	10,7360

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,1008

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 30°C #41	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	142,3	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8948	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	48,8766	0,0001	0,0062	0,0001
1	2998,9643	0,6916	0,3818	0,4860
2	6129,2869	1,2985	0,7804	0,9125
3	8378,7004	1,9053	1,0668	1,3390
4	10212,6088	2,6034	1,3003	1,8295
5	12358,7901	3,8135	1,5736	2,6799
6	14124,0205	5,2996	1,7983	3,7242
7	15853,0656	7,2628	2,0185	5,1039
8	17523,4237	9,6217	2,2312	6,7616
9	19171,0309	12,4793	2,4409	8,7697
10	19381,0482	9,1689	2,4677	6,4434

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
20444,7441	15,2643	2,6031	10,7268

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,0037

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 30°C #42		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		144,9	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8787	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	56,7053	0,0001	0,0072	0,0000
1	1969,3388	0,7298	0,2507	0,5037
2	4189,1468	1,2864	0,5334	0,8878
3	6048,5929	1,8430	0,7701	1,2719
4	7732,0568	2,4975	0,9845	1,7236
5	9719,5457	3,6091	1,2375	2,4907
6	11353,1037	4,9781	1,4455	3,4356
7	12932,1400	6,7774	1,6466	4,6773
8	14463,2002	8,9805	1,8415	6,1977
9	15968,0519	11,6530	2,0331	8,0421
10	17342,8610	9,2308	2,2082	6,3705

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
17398,5414	14,9965	2,2153	10,3496

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,6895

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 30°C #43		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		145,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8763	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	57,2683	0,0001	0,0073	0,0000
1	2081,2343	0,6227	0,2650	0,4285
2	4358,5794	1,1707	0,5550	0,8057
3	6189,3648	1,7188	0,7881	1,1829
4	7855,2375	2,3714	1,0002	1,6321
5	9790,2973	3,4675	1,2465	2,3865
6	11380,6428	4,7981	1,4490	3,3022
7	12938,5817	6,5624	1,6474	4,5164
8	14446,6186	8,7785	1,8394	6,0416
9	15913,1054	11,6257	2,0261	8,0012
10	16604,6163	9,3565	2,1142	6,4394

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
17134,3808	15,1976	2,1816	10,4594

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,7132

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 40°C #44		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		145,7	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8739	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,2090	0,0001	0,0041	0,0001
1	2541,3931	0,6377	0,3236	0,4377
2	5296,8266	1,2197	0,6744	0,8371
3	7483,5736	1,8017	0,9528	1,2366
4	9164,3905	2,3942	1,1668	1,6433
5	11319,2912	3,4954	1,4412	2,3990
6	13025,6657	4,8568	1,6585	3,3334
7	14678,6313	6,7623	1,8689	4,6412
8	16275,8169	9,2296	2,0723	6,3347
9	17823,6215	12,3391	2,2694	8,4688
10	17833,7504	8,7170	2,2707	5,9828

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
18939,3920	15,2492	2,4114	10,4662

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,9161

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 40°C #45		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		142,4	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8941	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	46,9422	0,0002	0,0060	0,0001
1	2999,0293	0,7411	0,3818	0,5204
2	6416,7476	1,3662	0,8170	0,9594
3	9005,4614	1,9913	1,1466	1,3984
4	10895,4959	2,6226	1,3873	1,8417
5	13142,5861	3,7248	1,6734	2,6157
6	14990,4317	5,1438	1,9086	3,6122
7	16774,7332	7,1648	2,1358	5,0315
8	18488,4632	9,7464	2,3540	6,8444
9	20169,0617	12,8473	2,5680	9,0220
10	20575,0051	9,5512	2,6197	6,7073

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
21537,8894	15,8903	2,7423	11,1589

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,1315

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 40°C #46	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	143	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8904	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	31,7762	0,0001	0,0040	0,0001
1	2596,9059	0,6899	0,3306	0,4824
2	5702,2970	1,2811	0,7260	0,8959
3	8115,1291	1,8724	1,0333	1,3094
4	9910,5970	2,4641	1,2619	1,7231
5	12031,4651	3,4678	1,5319	2,4250
6	13796,3226	4,7427	1,7566	3,3166
7	15513,3052	6,5533	1,9752	4,5828
8	17142,2245	8,8556	2,1826	6,1928
9	18738,9273	11,6501	2,3859	8,1469
10	20226,6595	8,5714	2,5753	5,9940

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
20279,8755	14,9930	2,5821	10,4846

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,0332

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 50°C #47	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	148,3	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8586	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	59,1208	0,0001	0,0075	0,0001
1	2446,7626	0,6054	0,3115	0,4082
2	5479,8494	1,1602	0,6977	0,7823
3	7930,9142	1,7150	1,0098	1,1564
4	9802,2681	2,2698	1,2481	1,5305
5	11523,3151	2,9501	1,4672	1,9893
6	13429,2499	4,0631	1,7099	2,7398
7	15044,0089	5,5961	1,9155	3,7735
8	16568,0450	7,9282	2,1095	5,3461
9	18031,1388	11,1397	2,2958	7,5116
10	19340,2709	9,2308	2,4625	6,2244

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
19416,4479	14,9701	2,4722	10,0945

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,0733

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 50°C #48	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	144,8	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8793	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	58,0078	0,0001	0,0074	0,0001
1	3026,8235	0,6079	0,3854	0,4198
2	6487,0232	1,1672	0,8260	0,8061
3	9009,9689	1,7266	1,1472	1,1924
4	10885,5407	2,2859	1,3860	1,5787
5	12680,4849	3,0181	1,6145	2,0843
6	14555,5920	4,1497	1,8533	2,8658
7	16195,3321	5,7392	2,0621	3,9635
8	17725,5262	8,0959	2,2569	5,5911
9	19206,2529	11,2655	2,4454	7,7800
10	20536,6070	9,2308	2,6148	6,3749

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
20616,7009	14,9732	2,6250	10,3406

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,1934

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D5 Tempern 50°C #49	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	146,7	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8679	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	54,3216	0,0001	0,0069	0,0001
1	2783,5621	0,6953	0,3544	0,4739
2	5993,5066	1,2504	0,7631	0,8524
3	8420,1526	1,8055	1,0721	1,2308
4	10254,8743	2,3607	1,3057	1,6092
5	12055,9105	3,1010	1,5350	2,1138
6	13889,2621	4,2221	1,7684	2,8781
7	15496,9100	5,8002	1,9731	3,9538
8	17015,6966	8,1572	2,1665	5,5605
9	18482,0185	11,3088	2,3532	7,7088
10	19816,0948	9,2308	2,5231	6,2923

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
19882,6662	14,9662	2,5315	10,2019

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,1075

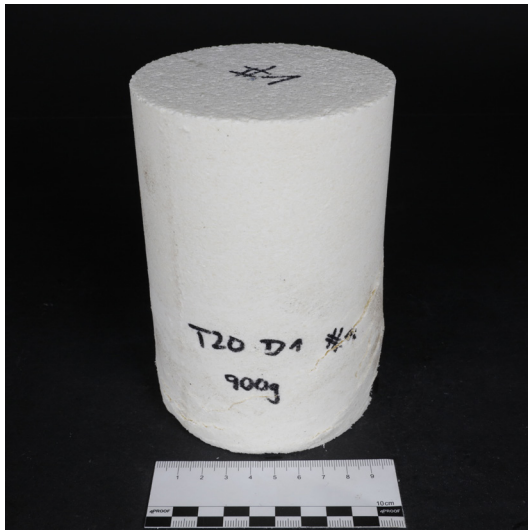
Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

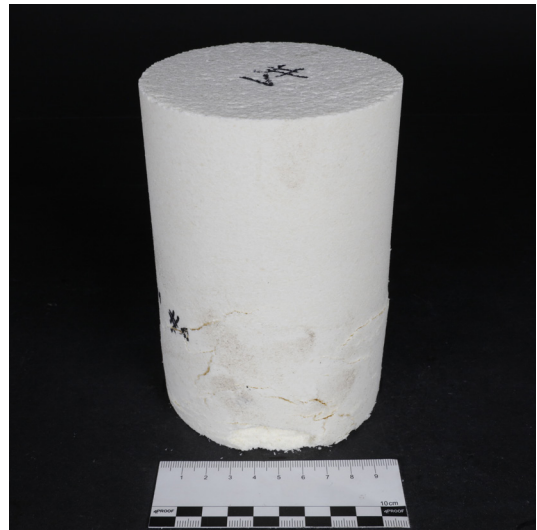
zusätzliche Anmerkungen:

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



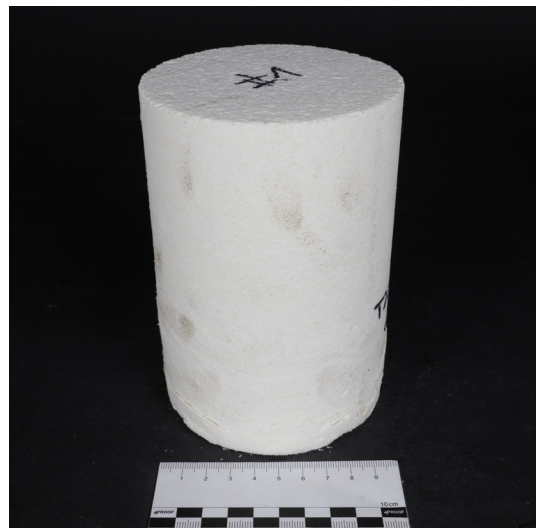
T20 D1 Tempern 30°C #1.1



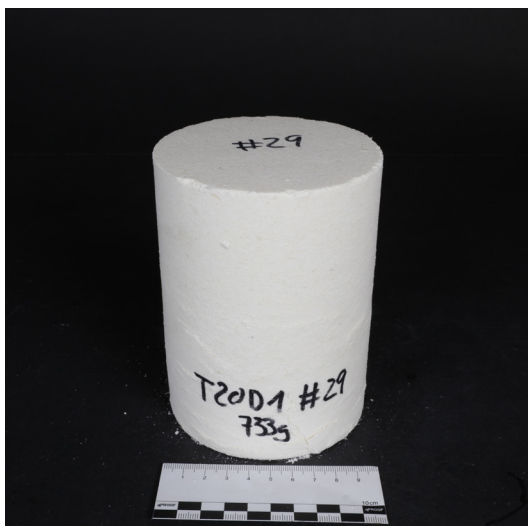
T20 D1 Tempern 30°C #1.2



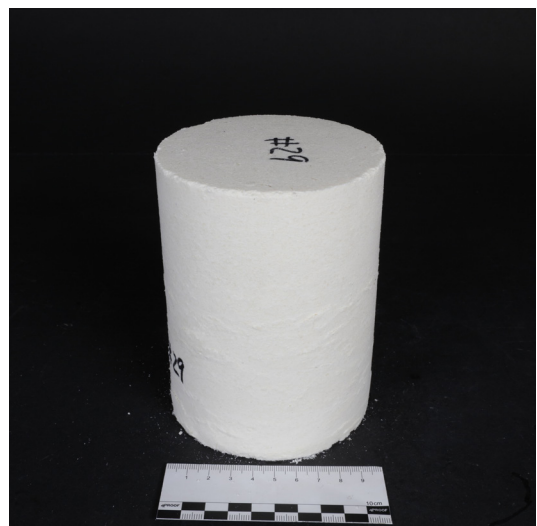
T20 D1 Tempern 30°C #1.3



T20 D1 Tempern 30°C #1.4



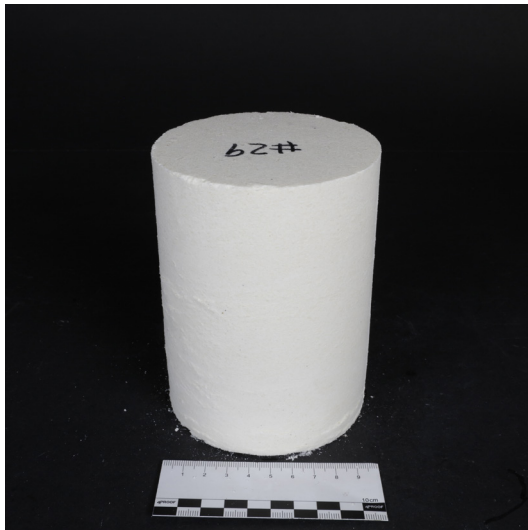
T20 D1 Tempern 30°C #29.1



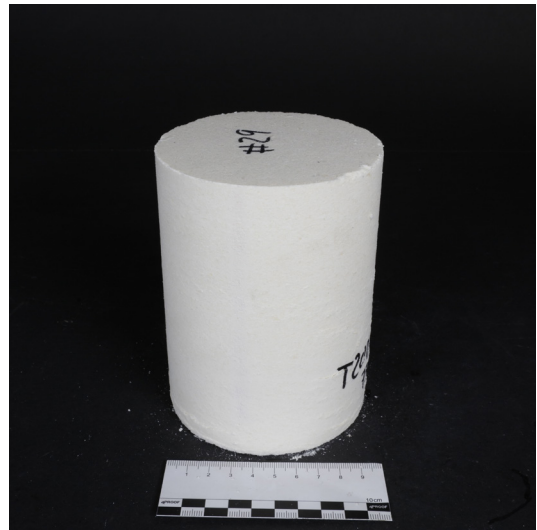
T20 D1 Tempern 30°C #29.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

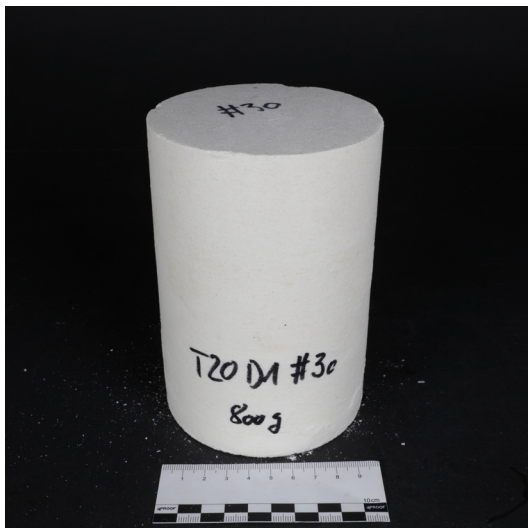
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



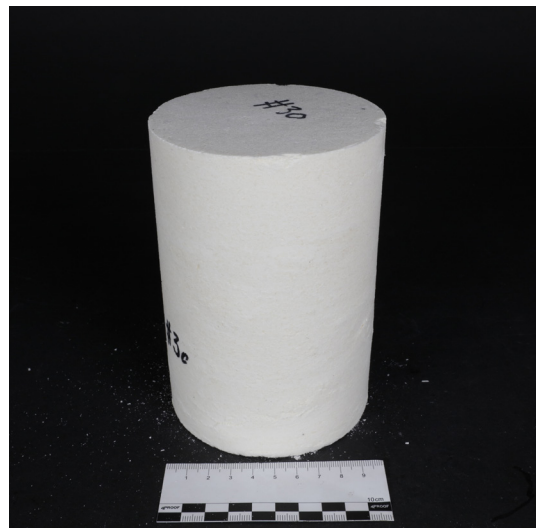
T20 D1 Tempern 30°C #29.3



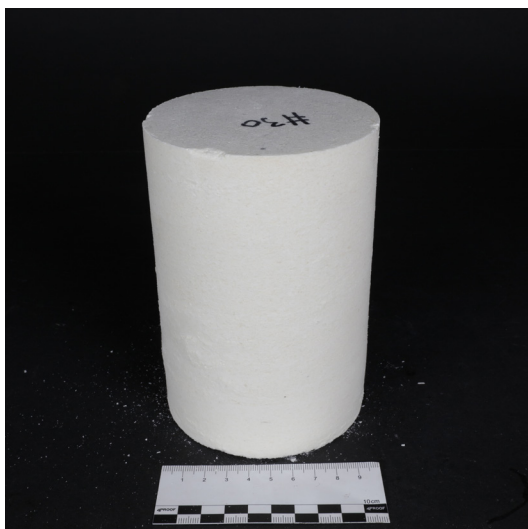
T20 D1 Tempern 30°C #29.4



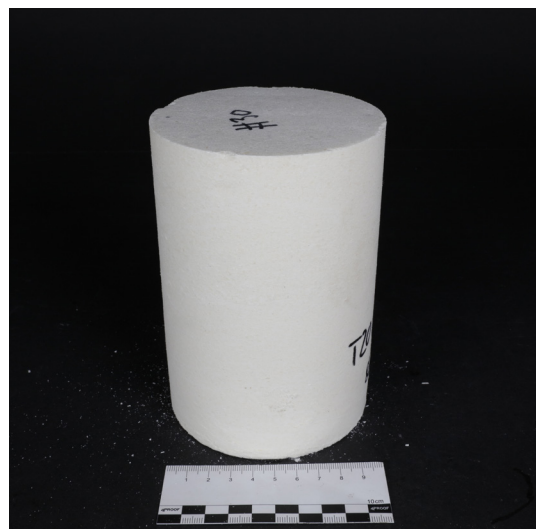
T20 D1 Tempern 30°C #30.1



T20 D1 Tempern 30°C #30.2



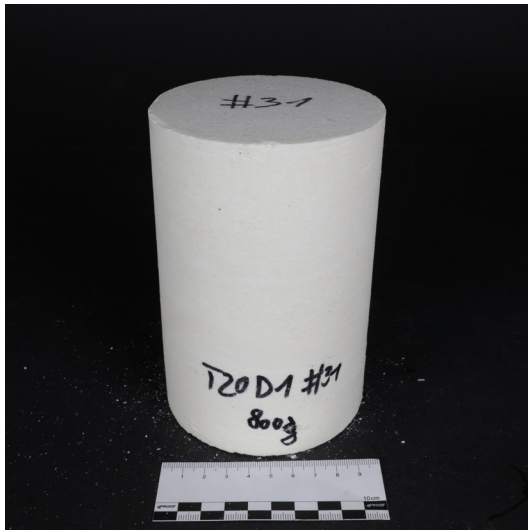
T20 D1 Tempern 30°C #30.3



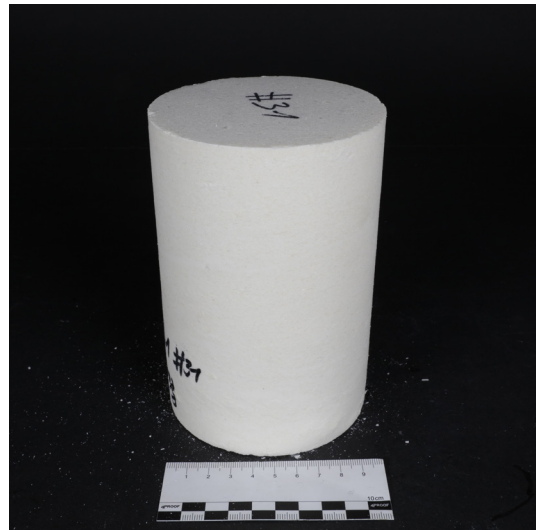
T20 D1 Tempern 30°C #30.4

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

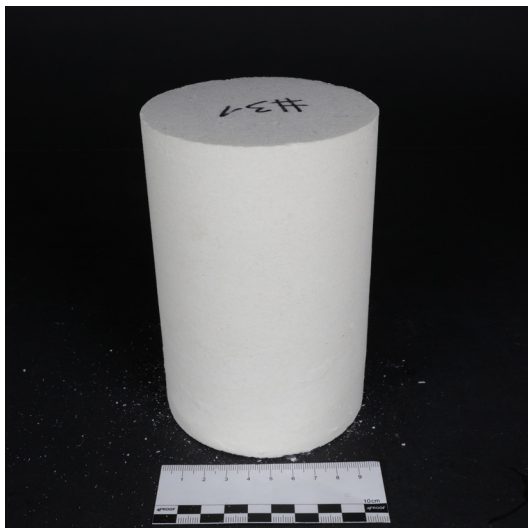
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



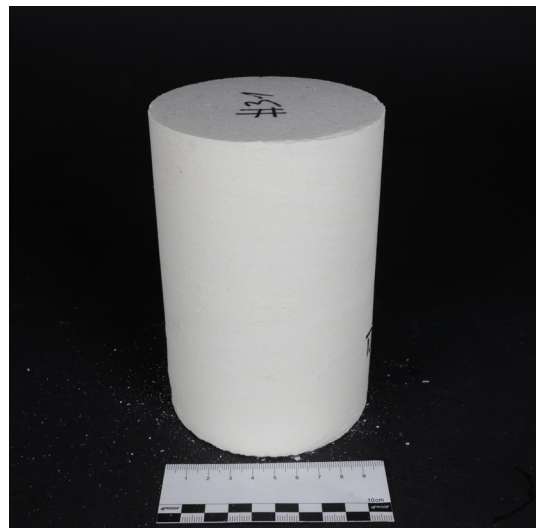
T20 D1 Tempern 40°C #31.1



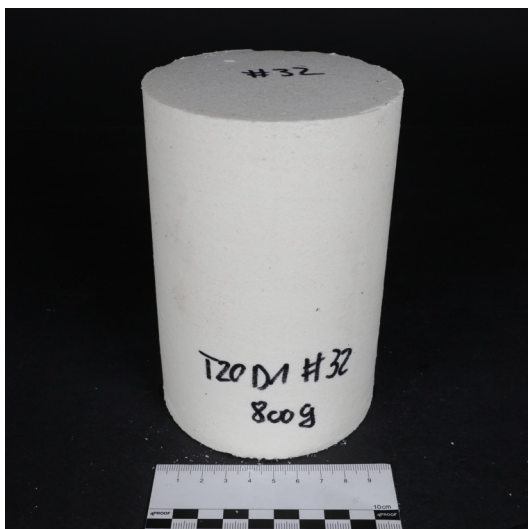
T20 D1 Tempern 40°C #31.2



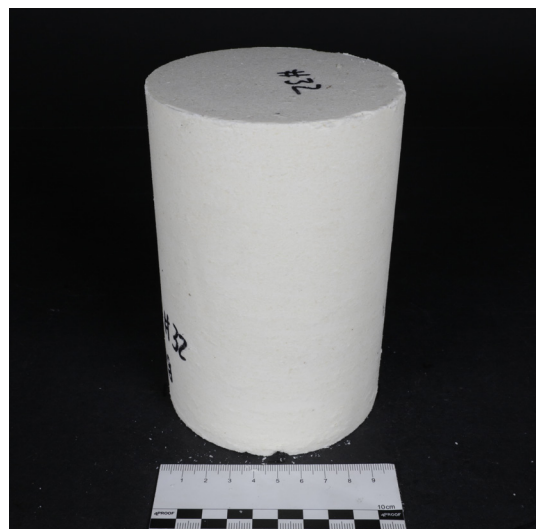
T20 D1 Tempern 40°C #31.3



T20 D1 Tempern 40°C #31.4



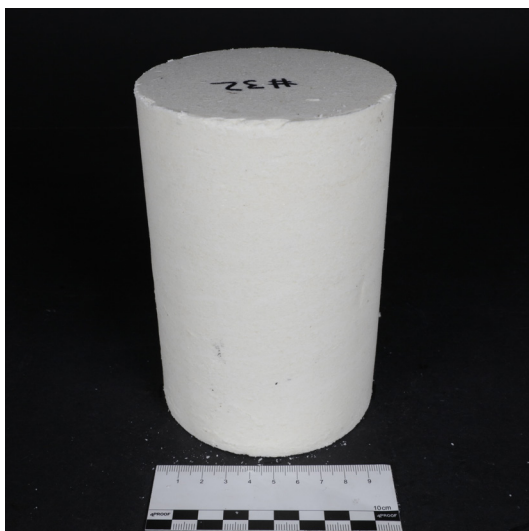
T20 D1 Tempern 40°C #32.1



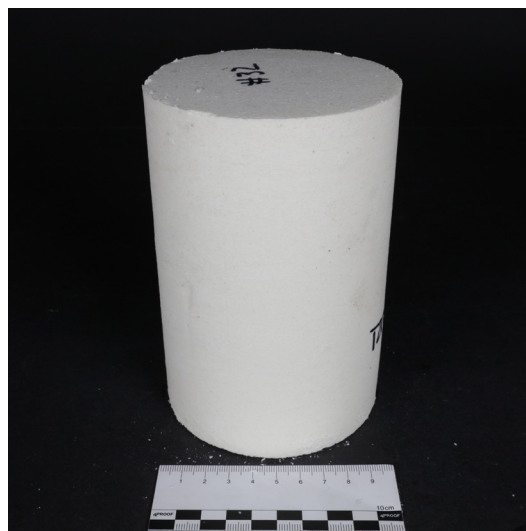
T20 D1 Tempern 40°C #32.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



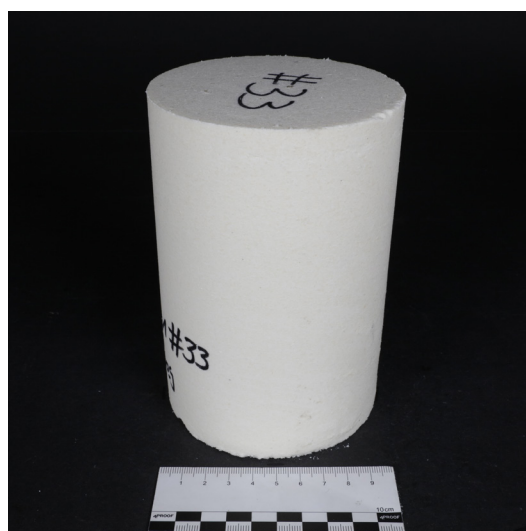
T20 D1 Tempern 40°C #32.3



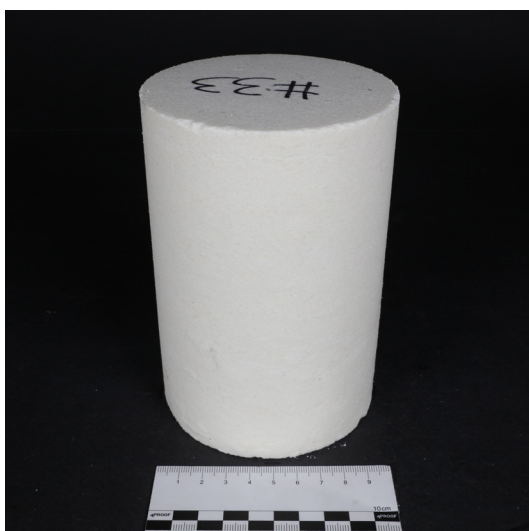
T20 D1 Tempern 40°C #32.4



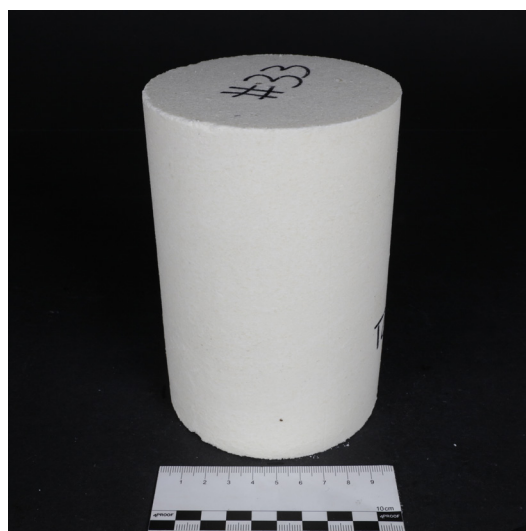
T20 D1 Tempern 40°C #33.1



T20 D1 Tempern 40°C #33.2



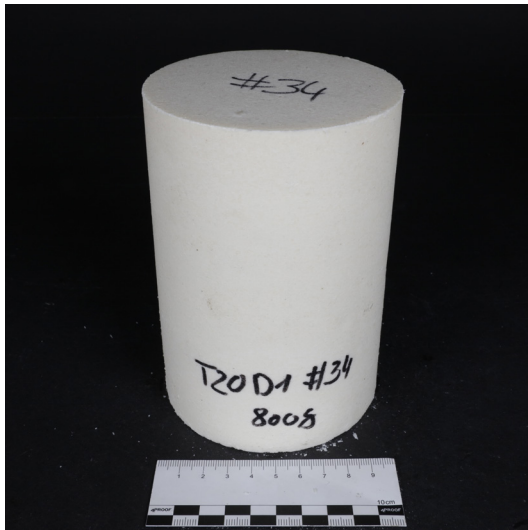
T20 D1 Tempern 40°C #33.3



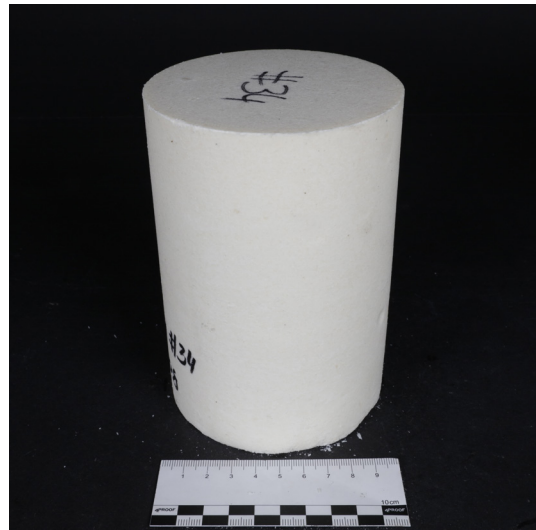
T20 D1 Tempern 40°C #33.4

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

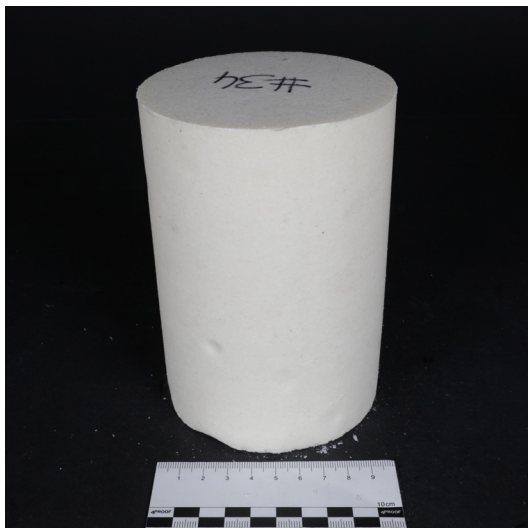
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



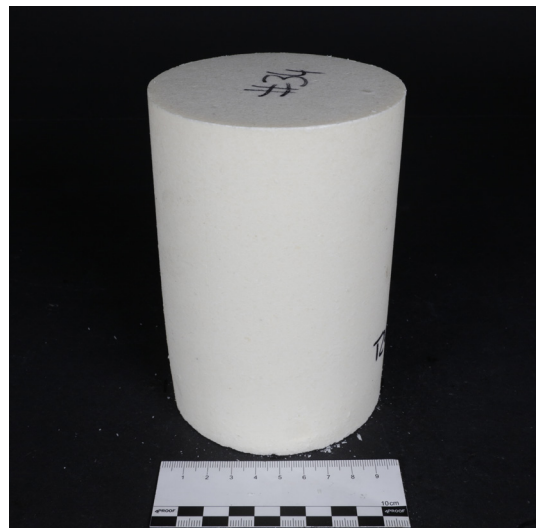
T20 D1 Tempern 50°C #34.1



T20 D1 Tempern 50°C #34.2



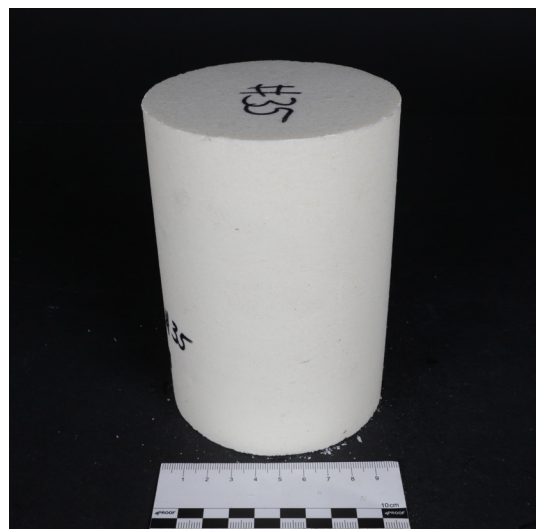
T20 D1 Tempern 50°C #34.3



T20 D1 Tempern 50°C #34.4



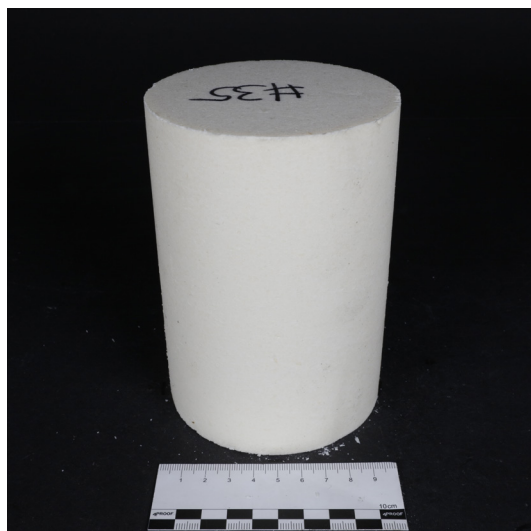
T20 D1 Tempern 50°C #35.1



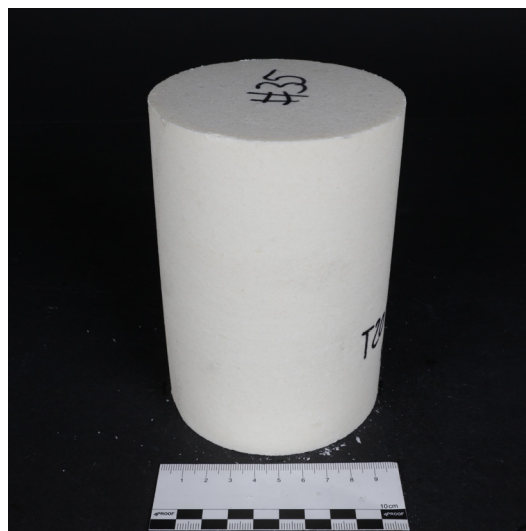
T20 D1 Tempern 50°C #35.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



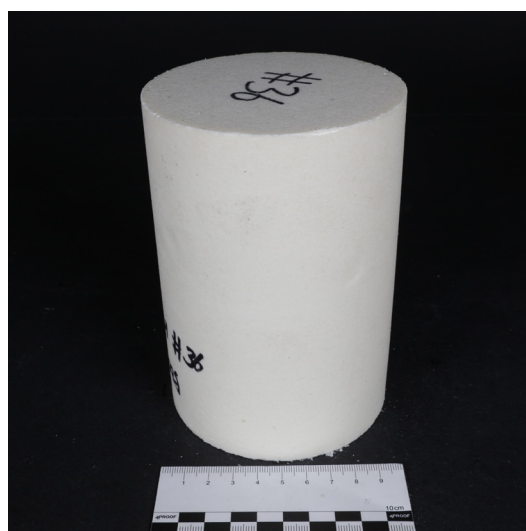
T20 D1 Tempern 50°C #35.3



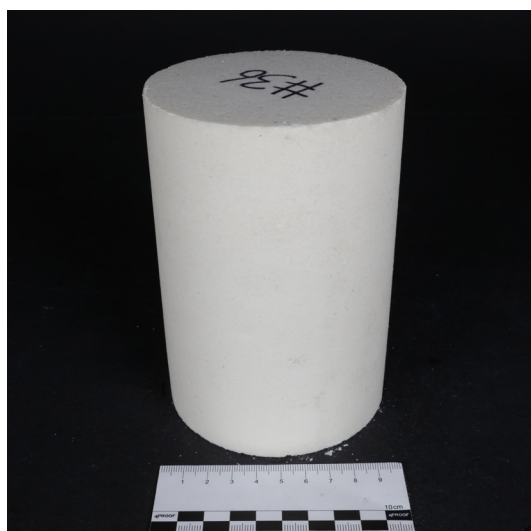
T20 D1 Tempern 50°C #35.4



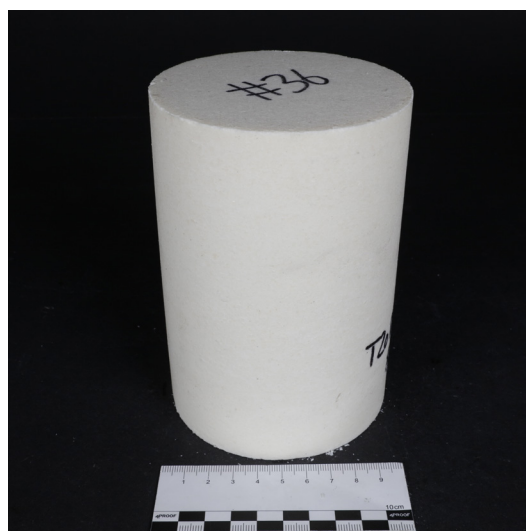
T20 D1 Tempern 50°C #36.1



T20 D1 Tempern 50°C #36.2



T20 D1 Tempern 50°C #36.3



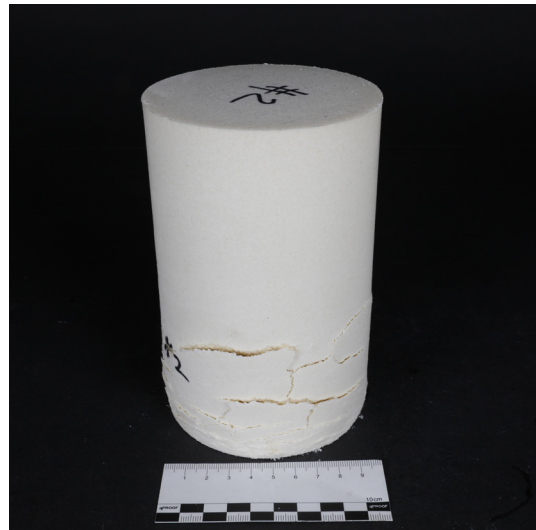
T20 D1 Tempern 50°C #36.4

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

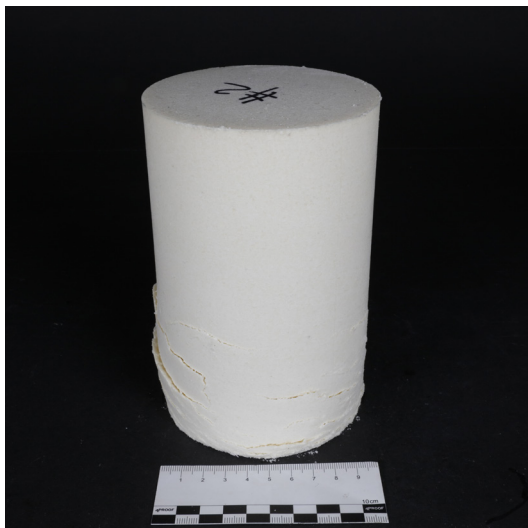
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



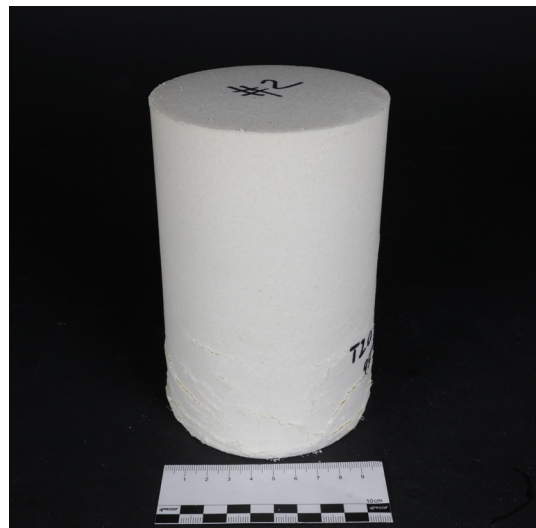
T20 D3 Tempern 30°C #2.1



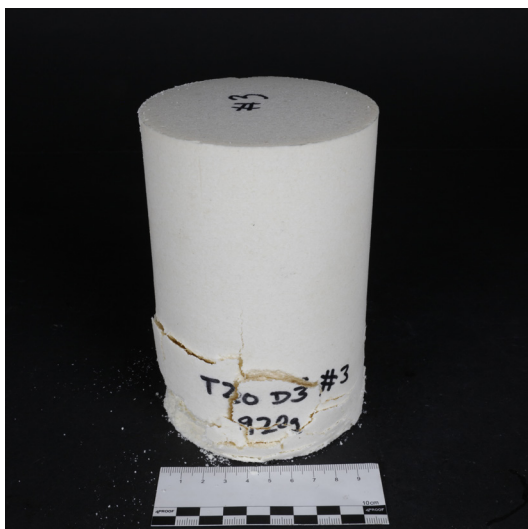
T20 D3 Tempern 30°C #2.2



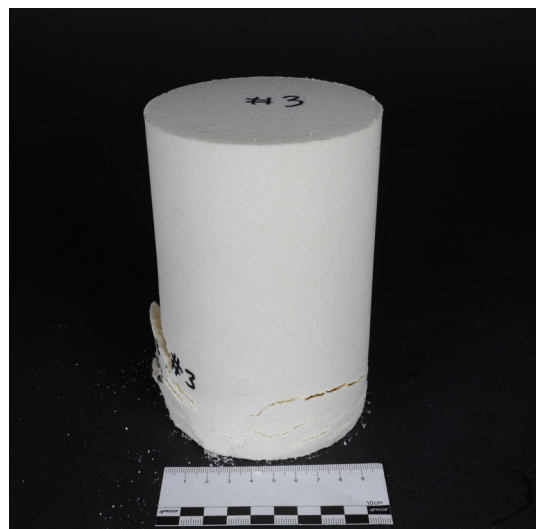
T20 D3 Tempern 30°C #2.3



T20 D3 Tempern 30°C #2.4



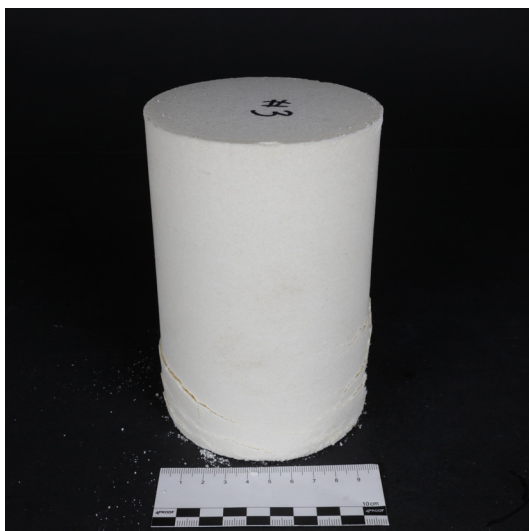
T20 D3 Tempern 30°C #3.1



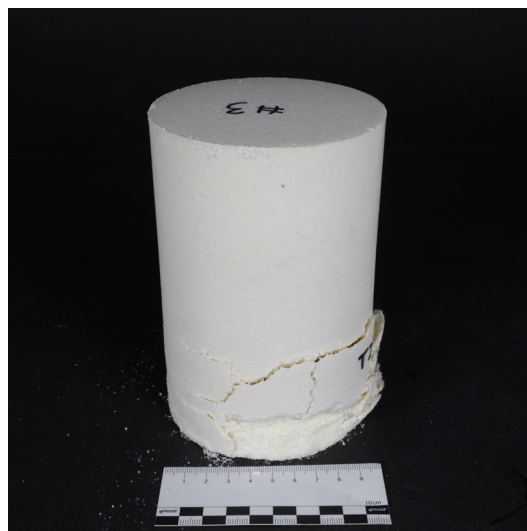
T20 D3 Tempern 30°C #3.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

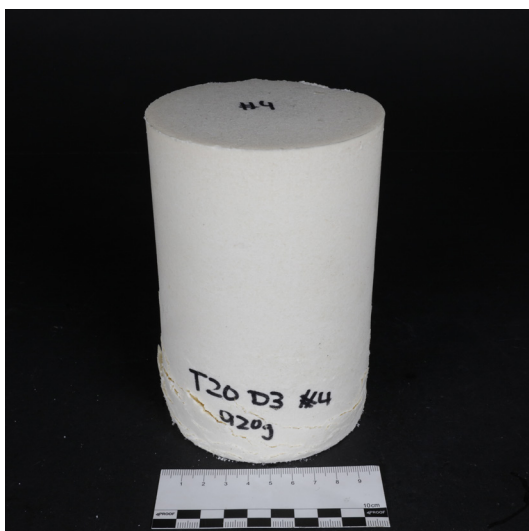
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



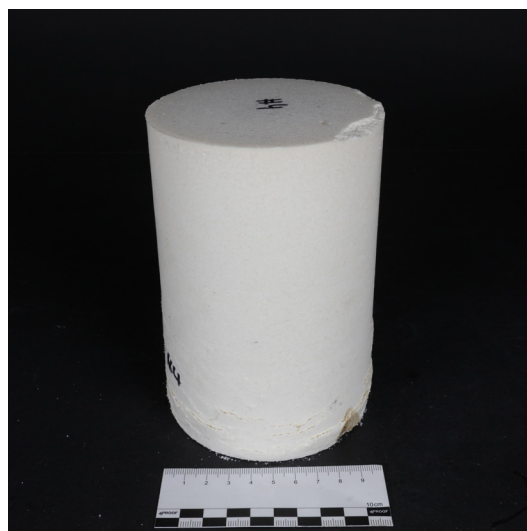
T20 D3 Tempern 30°C #3.3



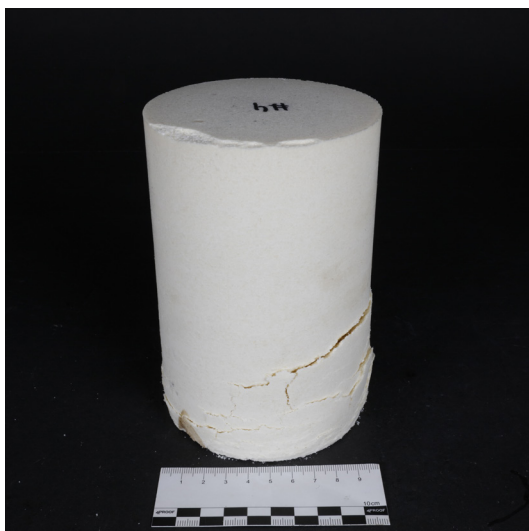
T20 D3 Tempern 30°C #3.4



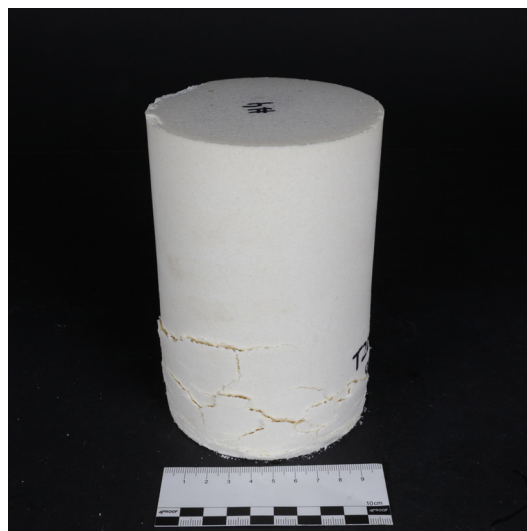
T20 D3 Tempern 30°C #4.1



T20 D3 Tempern 30°C #4.2



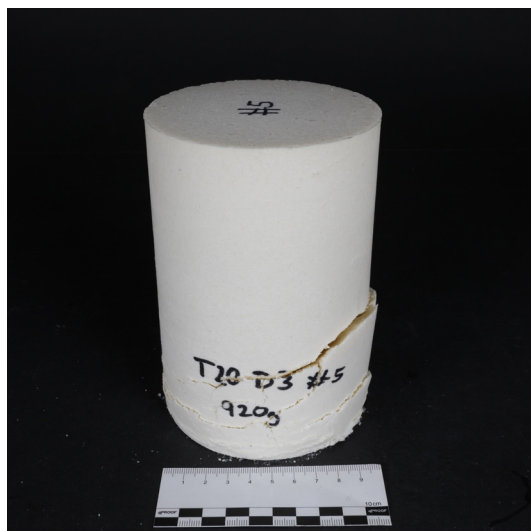
T20 D3 Tempern 30°C #4.3



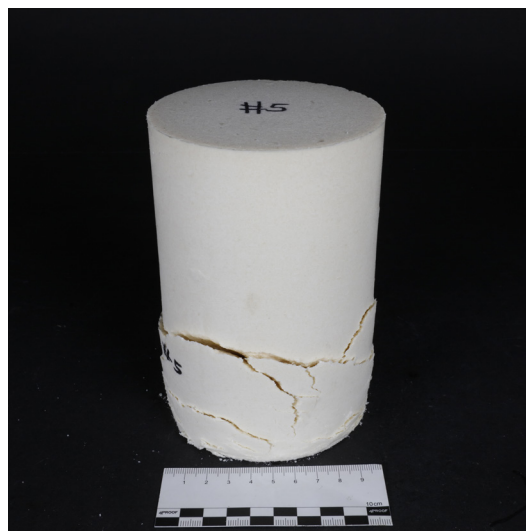
T20 D3 Tempern 30°C #4.4

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

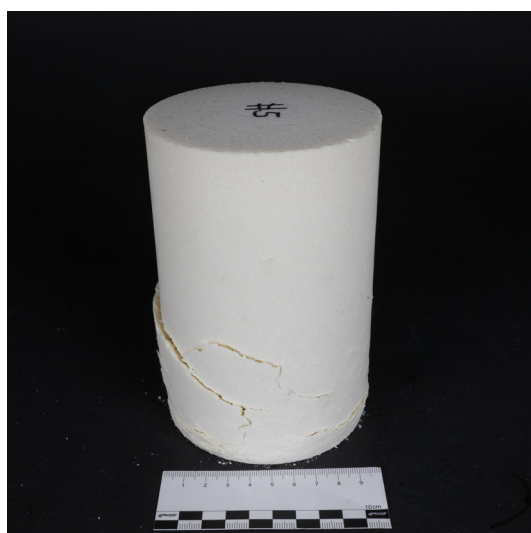
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



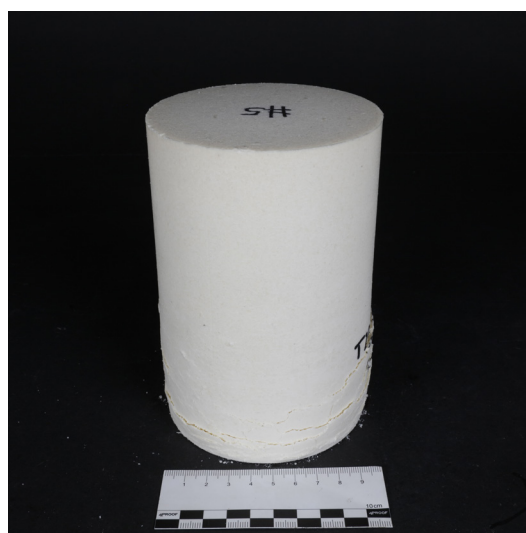
T20 D3 Tempern 40°C #5.1



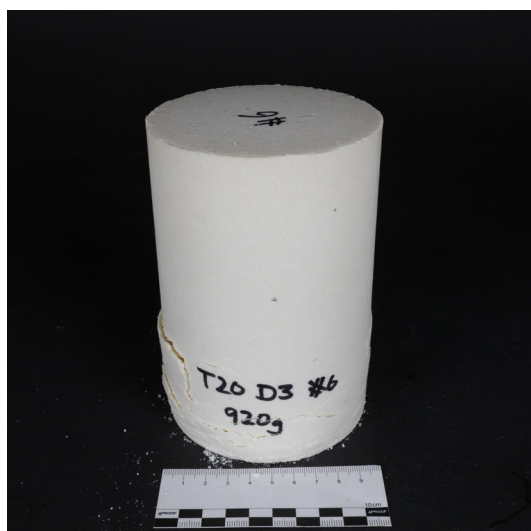
T20 D3 Tempern 40°C #5.2



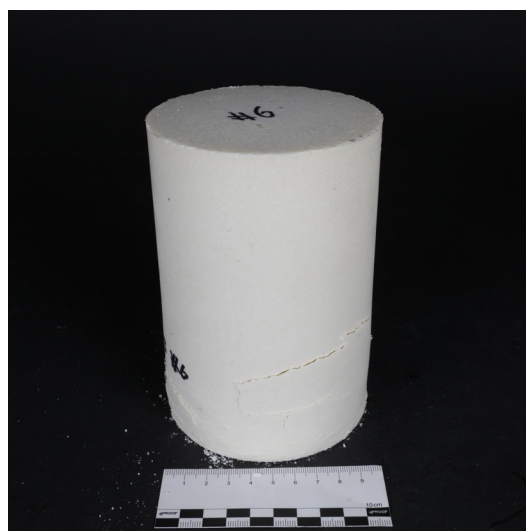
T20 D3 Tempern 40°C #5.3



T20 D3 Tempern 40°C #5.4



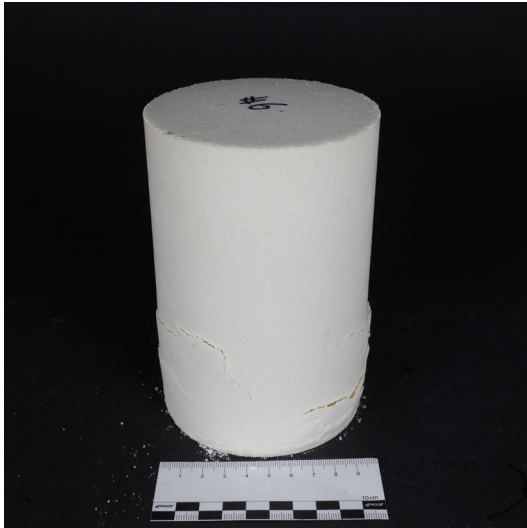
T20 D3 Tempern 40°C #6.1



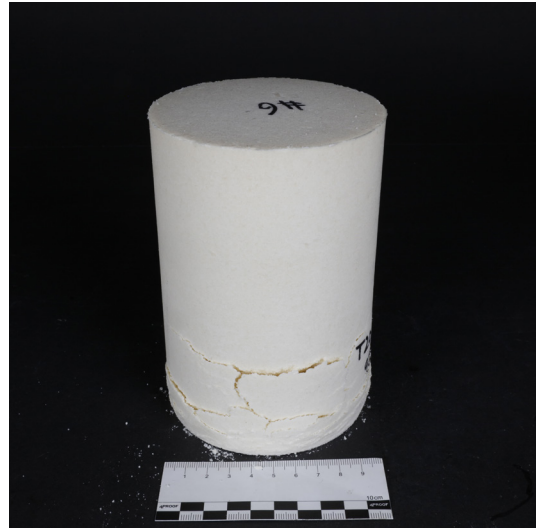
T20 D3 Tempern 40°C #6.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



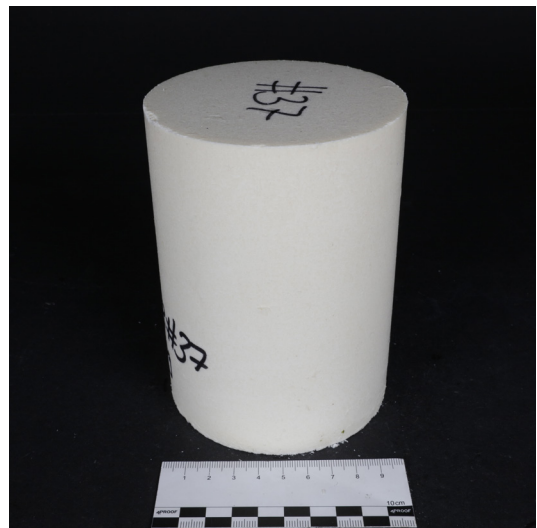
T20 D3 Tempern 40°C #6.3



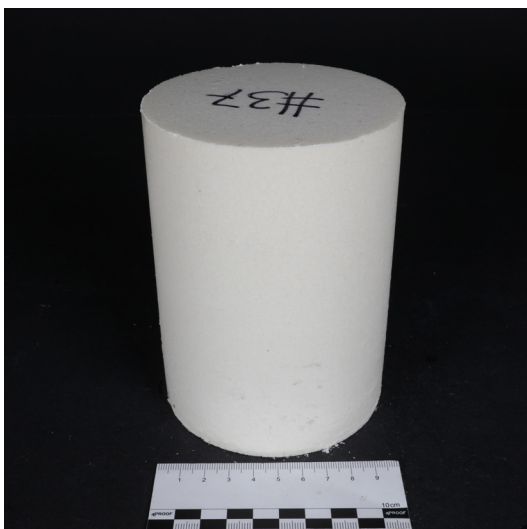
T20 D3 Tempern 40°C #6.4



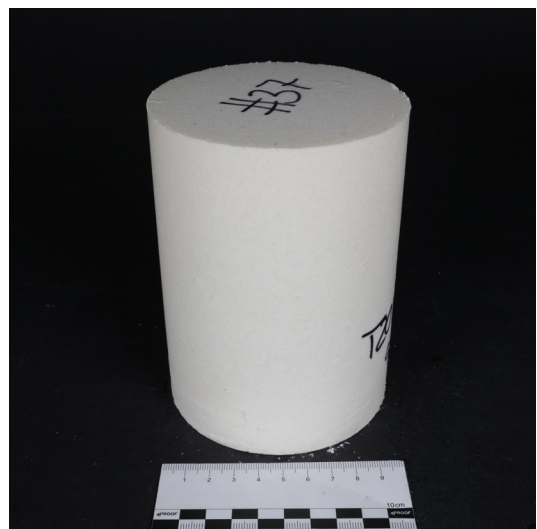
T20 D3 Tempern 40°C #37.1



T20 D3 Tempern 40°C #37.2



T20 D3 Tempern 40°C #37.3



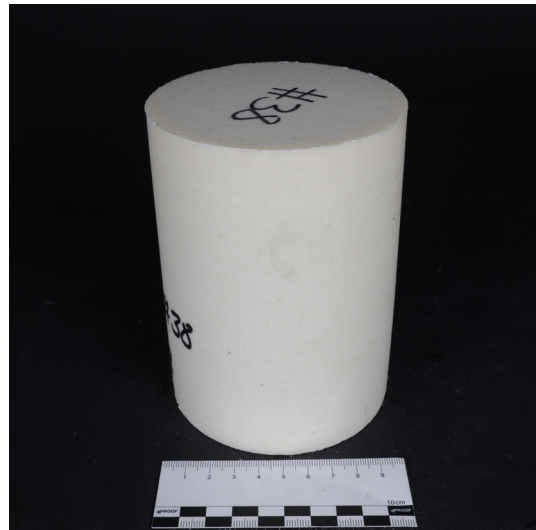
T20 D3 Tempern 40°C #37.4

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

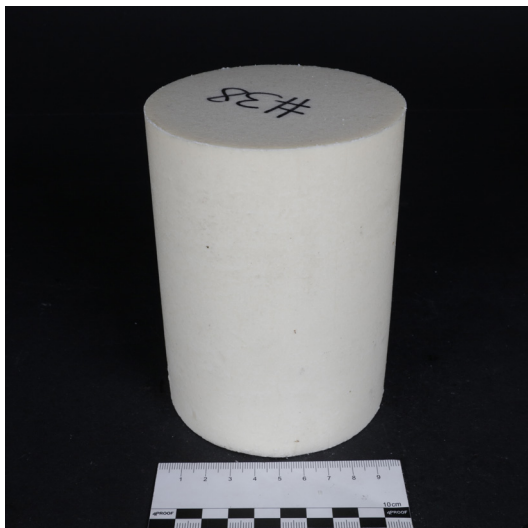
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



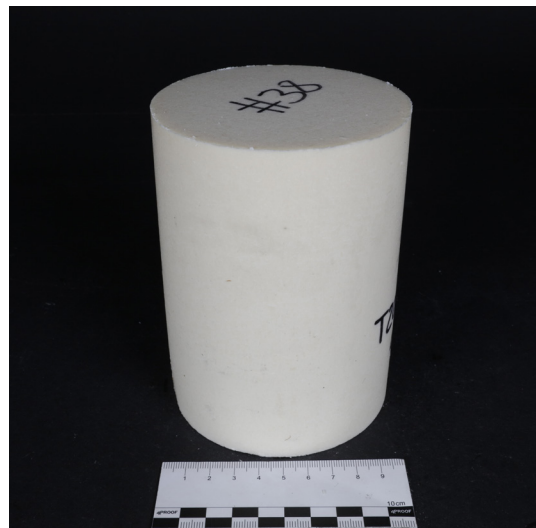
T20 D3 Tempern 50°C #38.1



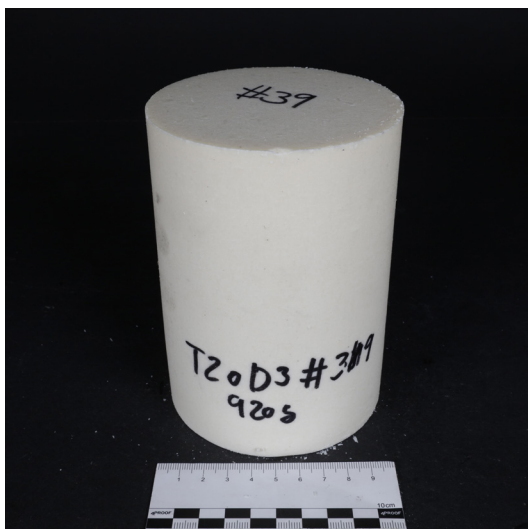
T20 D3 Tempern 50°C #38.2



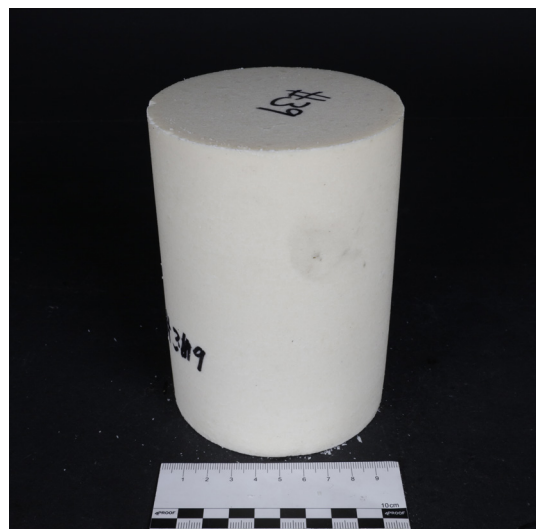
T20 D3 Tempern 50°C #38.3



T20 D3 Tempern 50°C #38.4



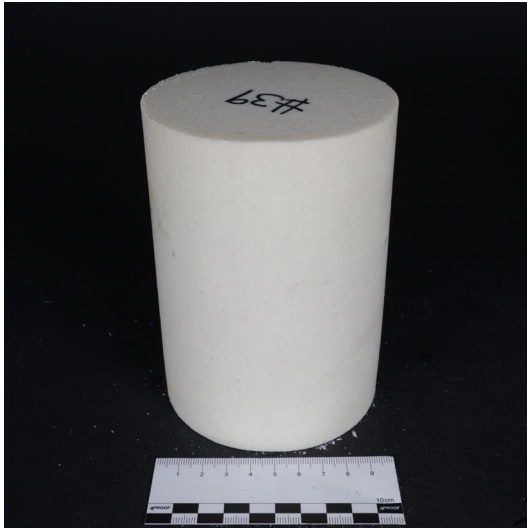
T20 D3 Tempern 50°C #39.1



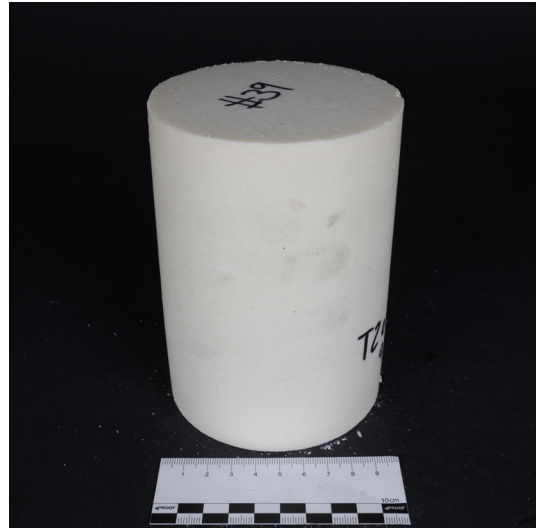
T20 D3 Tempern 50°C #39.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



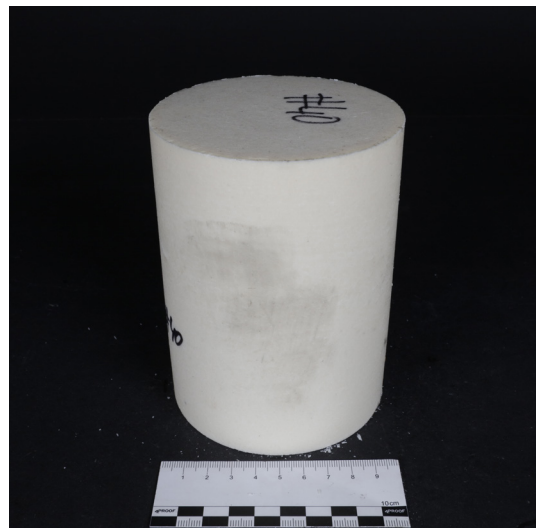
T20 D3 Tempern 50°C #39.3



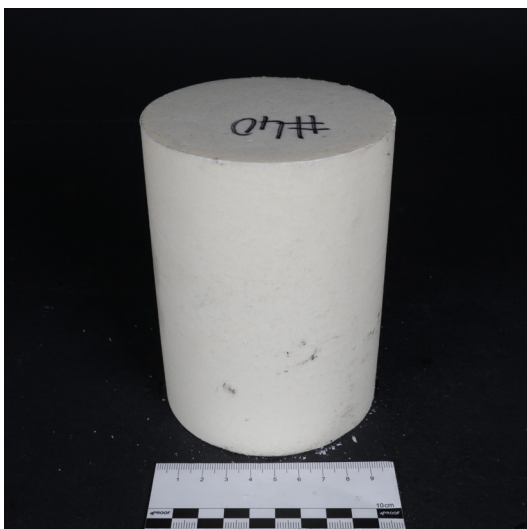
T20 D3 Tempern 50°C #39.4



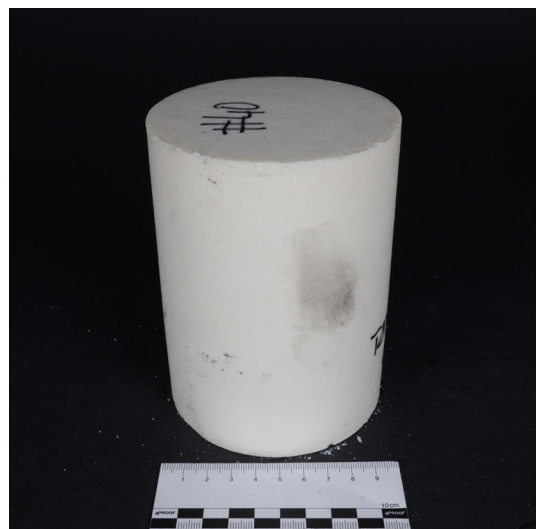
T20 D3 Tempern 50°C #40.1



T20 D3 Tempern 50°C #40.2



T20 D3 Tempern 50°C #40.3



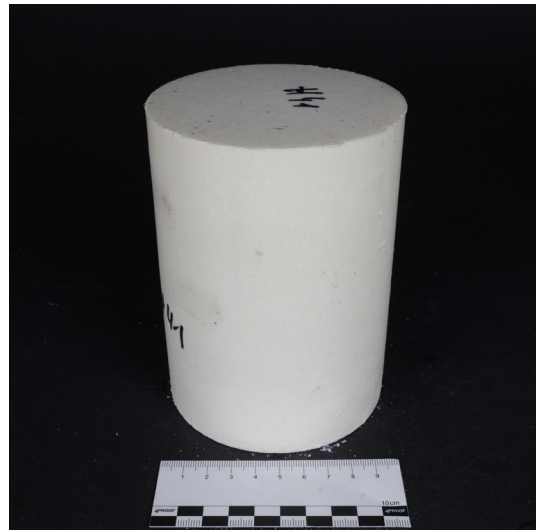
T20 D3 Tempern 50°C #40.4

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

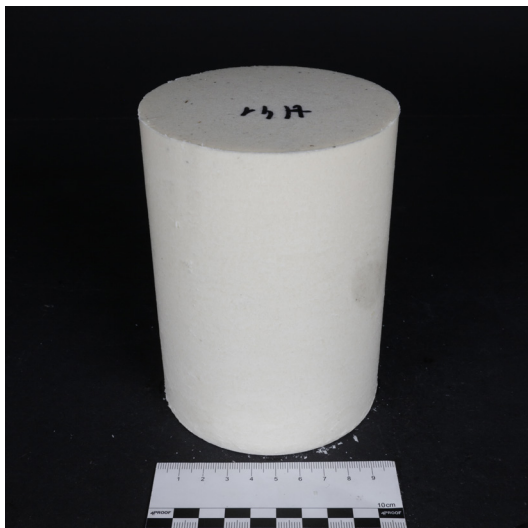
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



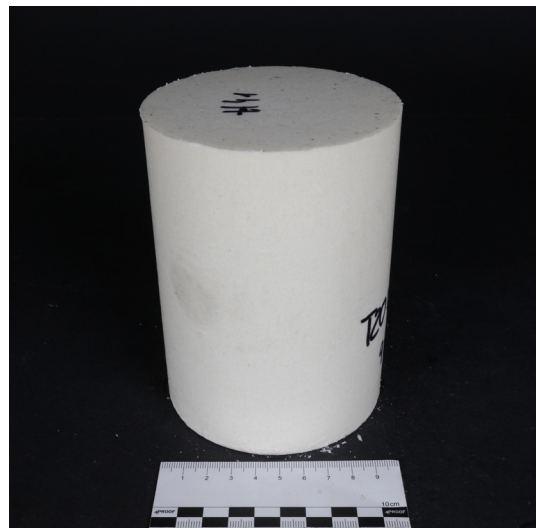
T20 D5 Tempern 30°C #41.1



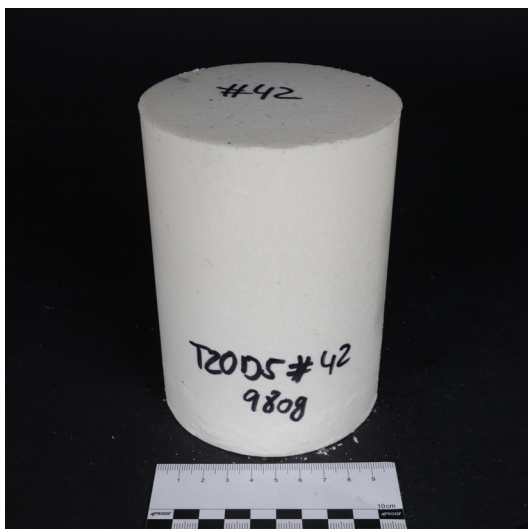
T20 D5 Tempern 30°C #41.2



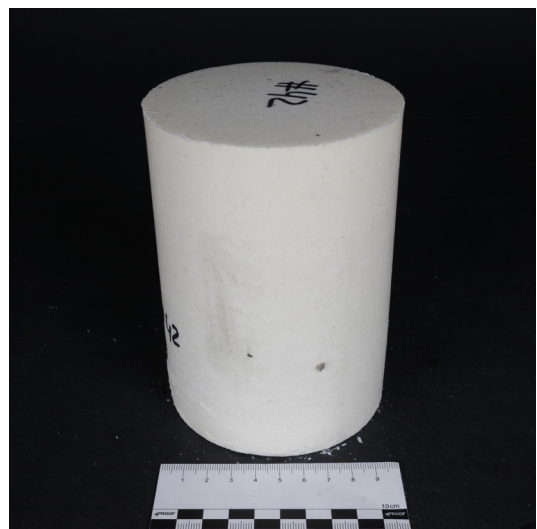
T20 D5 Tempern 30°C #41.3



T20 D5 Tempern 30°C #41.4



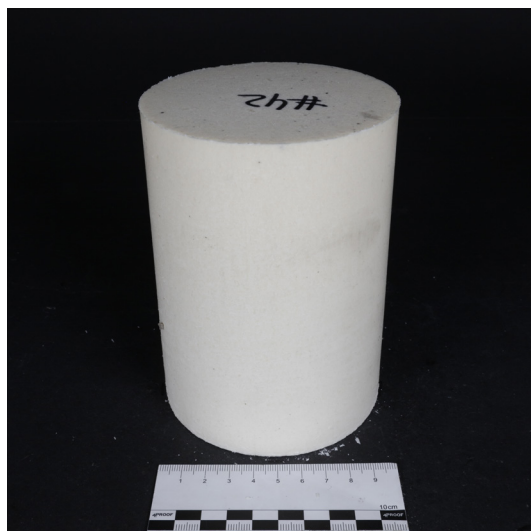
T20 D5 Tempern 30°C #42.1



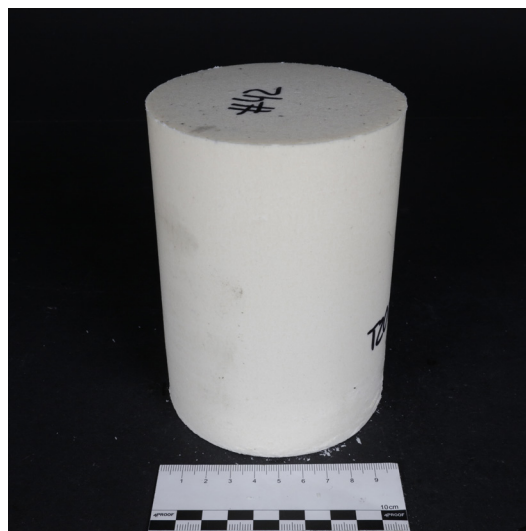
T20 D5 Tempern 30°C #42.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

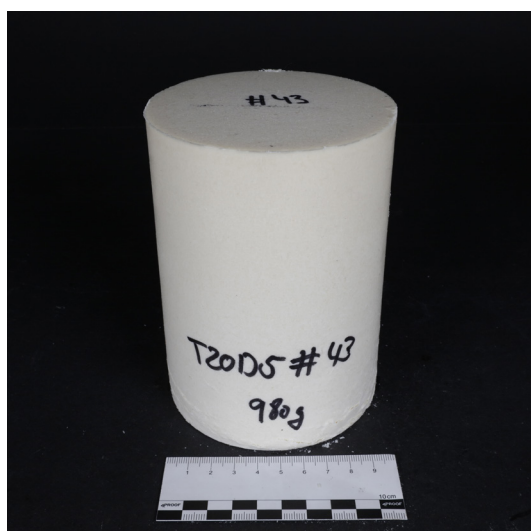
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



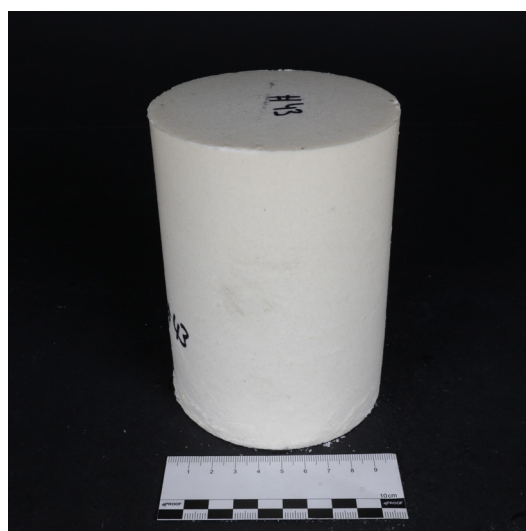
T20 D5 Tempern 30°C #42.3



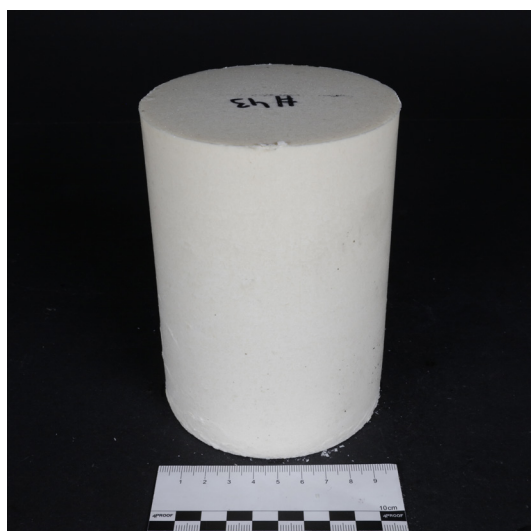
T20 D5 Tempern 30°C #42.4



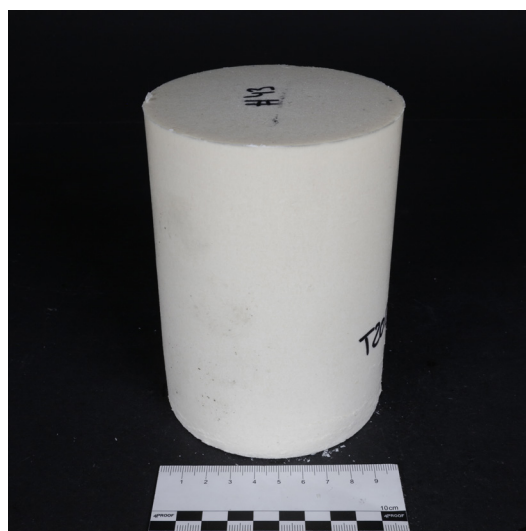
T20 D5 Tempern 30°C #43.1



T20 D5 Tempern 30°C #43.2



T20 D5 Tempern 30°C #43.3



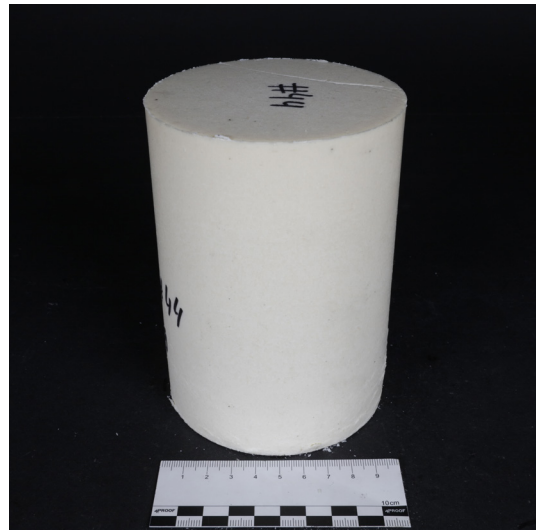
T20 D5 Tempern 30°C #43.4

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

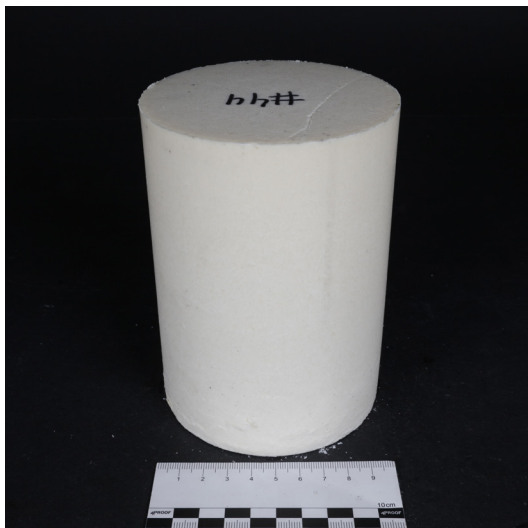
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



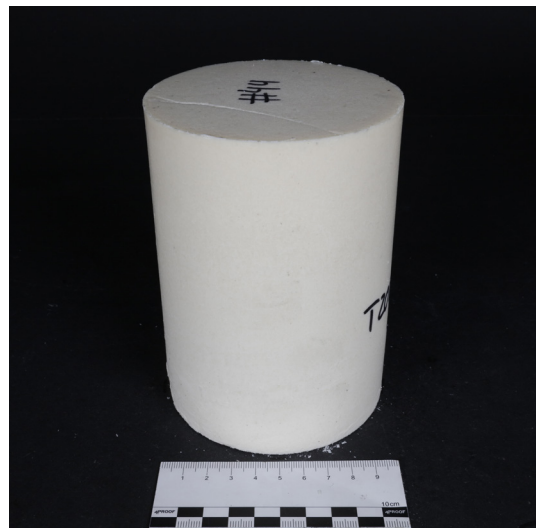
T20 D5 Tempern 40°C #44.1



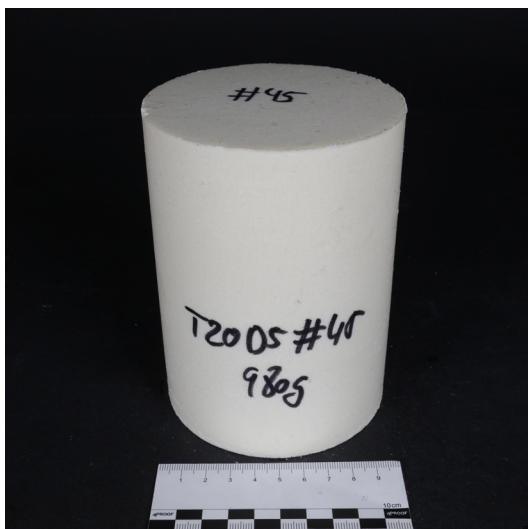
T20 D5 Tempern 40°C #44.2



T20 D5 Tempern 40°C #44.3



T20 D5 Tempern 40°C #44.4



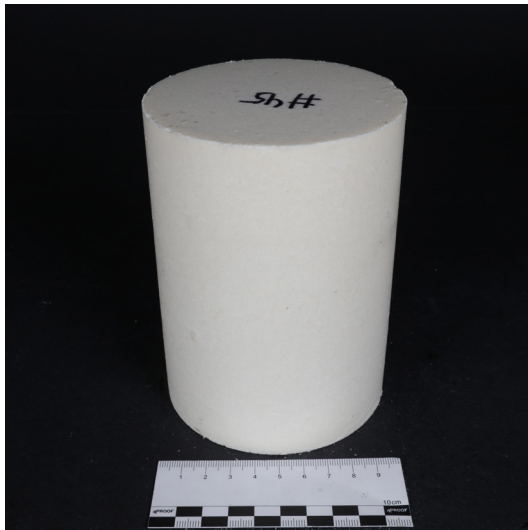
T20 D5 Tempern 40°C #45.1



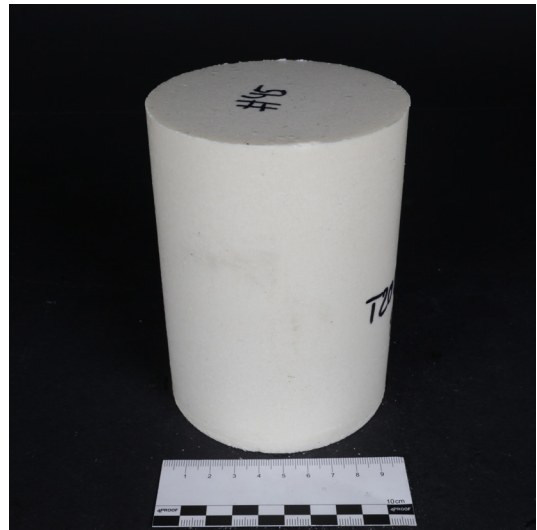
T20 D5 Tempern 40°C #45.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



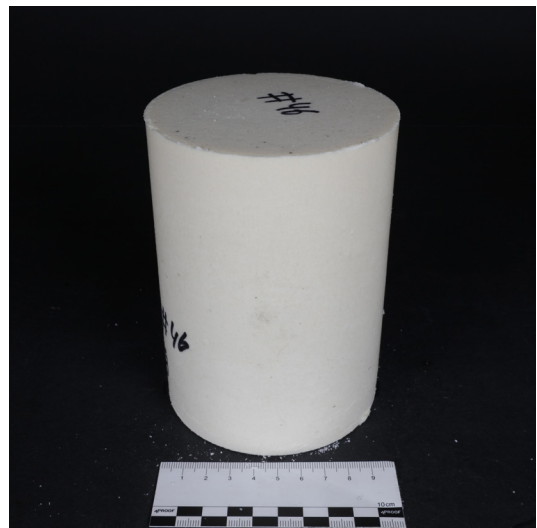
T20 D5 Tempern 40°C #45.3



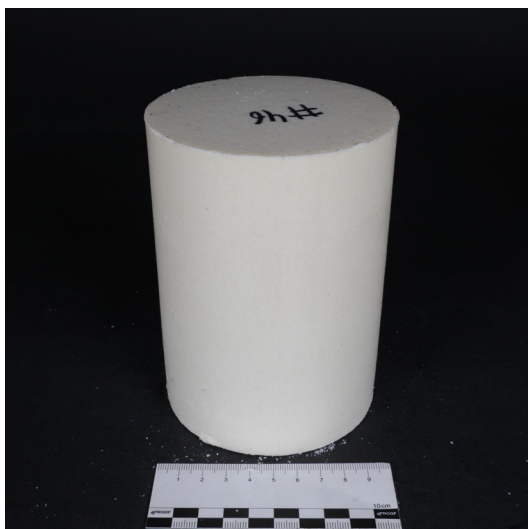
T20 D5 Tempern 40°C #45.4



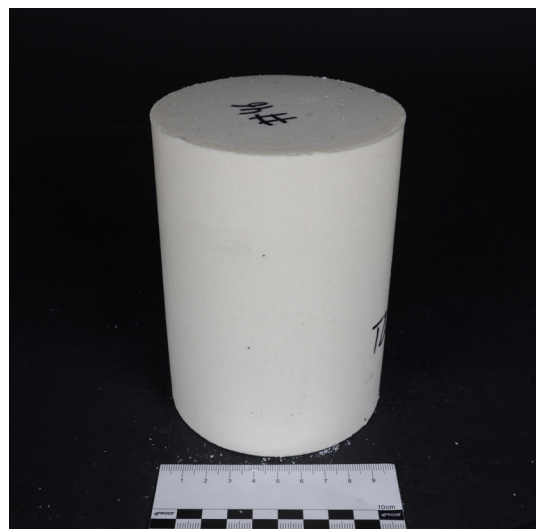
T20 D5 Tempern 40°C #46.1



T20 D5 Tempern 40°C #46.2



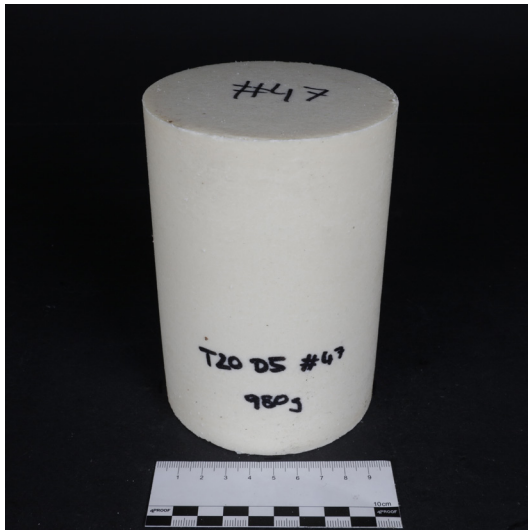
T20 D5 Tempern 40°C #46.3



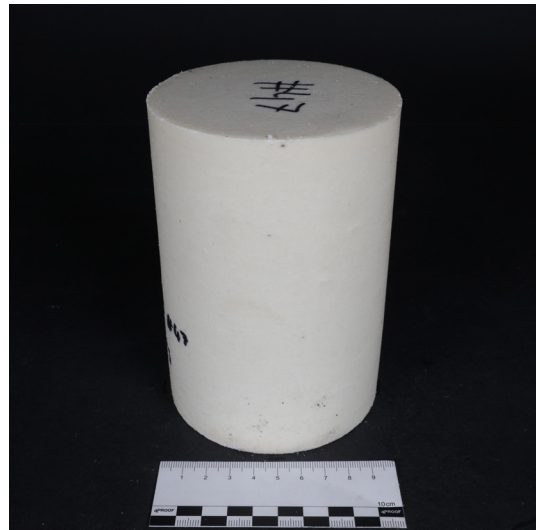
T20 D5 Tempern 40°C #46.4

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

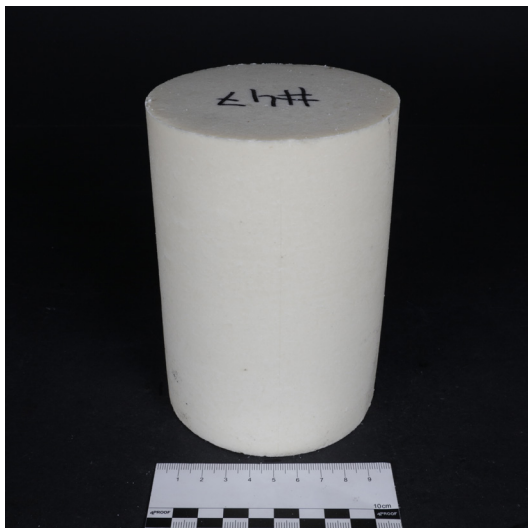
Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



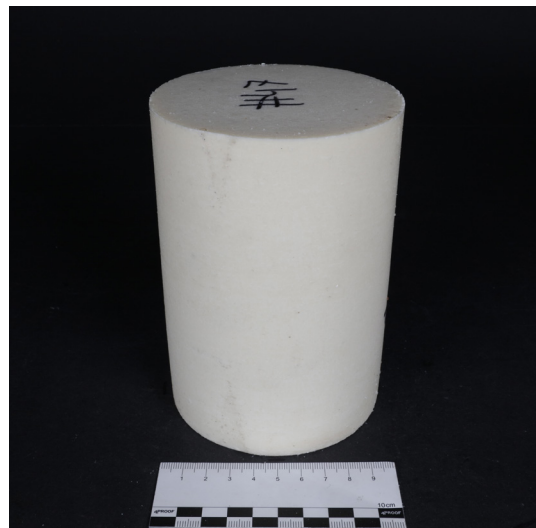
T20 D5 Tempern 50°C #47.1



T20 D5 Tempern 50°C #47.2



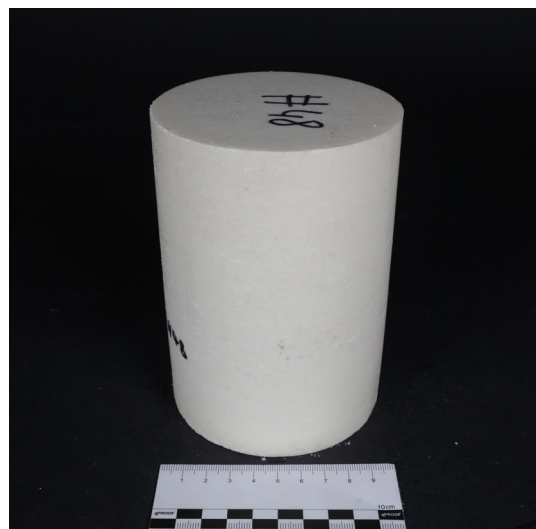
T20 D5 Tempern 50°C #47.3



T20 D5 Tempern 50°C #47.4



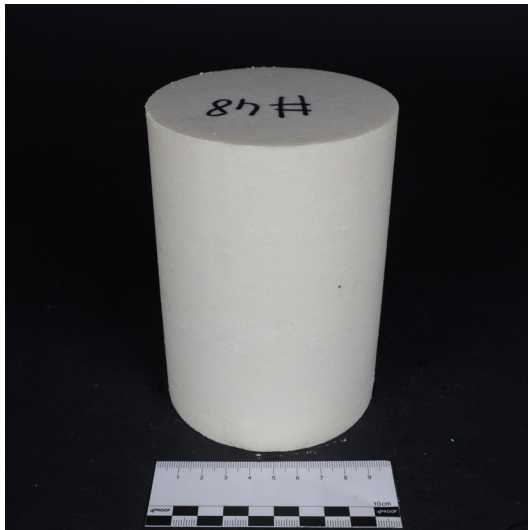
T20 D5 Tempern 50°C #48.1



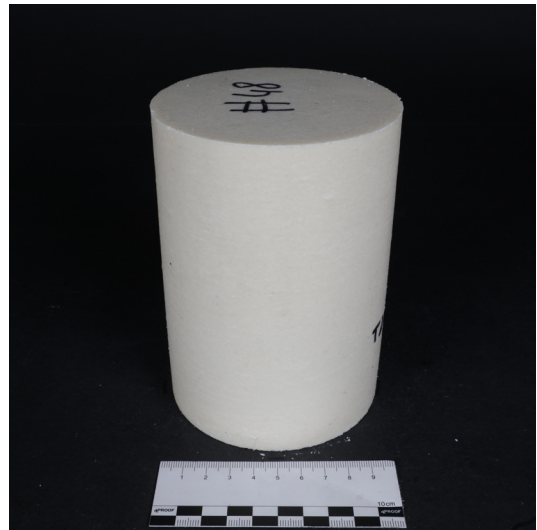
T20 D5 Tempern 50°C #48.2

Anhang J - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.5

Nachträgliches Tempern der gepressten Wachsprüfkörper
Fotos der Prüfkörper



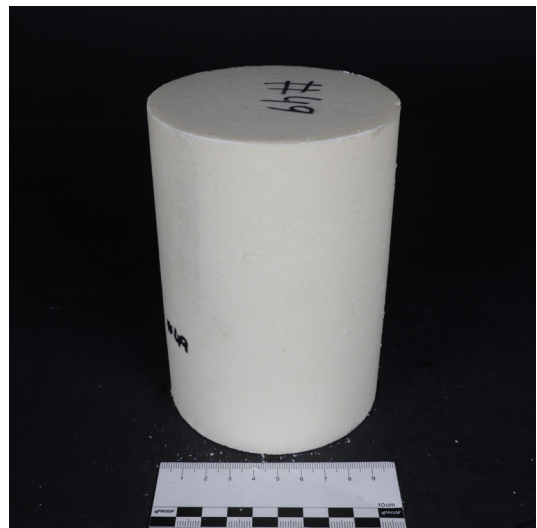
T20 D5 Tempern 50°C #48.3



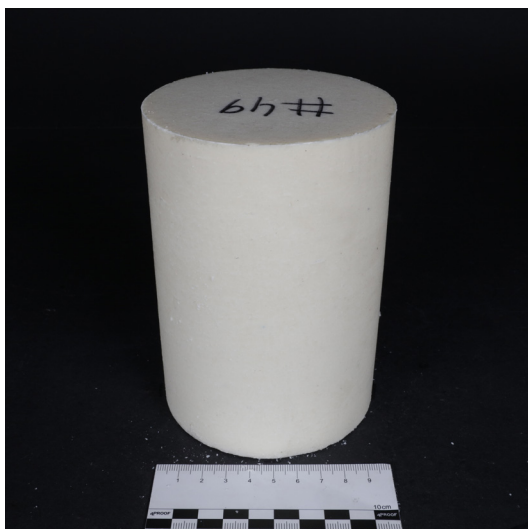
T20 D5 Tempern 50°C #48.4



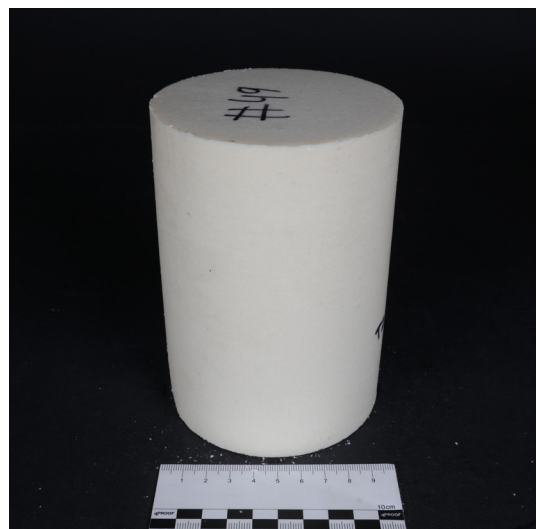
T20 D5 Tempern 50°C #49.1



T20 D5 Tempern 50°C #49.2



T20 D5 Tempern 50°C #49.3



T20 D5 Tempern 50°C #49.4

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Siloeffekt 5mm #19		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		141,8	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8979	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,4373	0,0000	0,0046	0,0000
1	1102,9699	0,4974	0,1404	0,3508
2	2172,9401	0,8437	0,2767	0,5950
3	3190,4094	1,2449	0,4062	0,8779
4	4493,0151	1,9374	0,5721	1,3663
5	5500,0195	2,7390	0,7003	1,9316
6	6478,8592	3,8409	0,8249	2,7087
7	7430,8686	5,2678	0,9461	3,7149
8	8355,7277	7,1425	1,0639	5,0370
9	9149,3648	10,0241	1,1649	7,0692
10	8737,2886	13,1612	1,1125	9,2815

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
9195,6336	10,8192	1,1708	7,6299

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
1,0604

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Siloeffekt 5mm #20		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		141,7	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8985	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,7443	0,0000	0,0047	0,0000
1	1085,5038	0,7120	0,1382	0,5025
2	1915,3998	1,0433	0,2439	0,7363
3	3056,9333	1,5652	0,3892	1,1046
4	3989,1346	2,1801	0,5079	1,5386
5	4888,7284	3,0604	0,6225	2,1598
6	5728,5382	4,1919	0,7294	2,9583
7	6545,9854	5,6328	0,8335	3,9751
8	7343,8530	7,4965	0,9350	5,2904
9	7976,2327	10,2148	1,0156	7,2088
10	7597,7755	13,1824	0,9674	9,3030

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7996,6885	10,7932	1,0182	7,6169

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9150

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Siloeffekt 5mm #21		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		141,6	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8992	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	43,5555	0,0000	0,0055	0,0000
1	917,3972	0,4501	0,1168	0,3179
2	1765,0850	0,7417	0,2247	0,5238
3	2739,1807	1,1497	0,3488	0,8119
4	3729,4973	1,7329	0,4749	1,2238
5	4588,3308	2,4719	0,5842	1,7457
6	5399,7779	3,4502	0,6875	2,4366
7	6190,5359	4,7135	0,7882	3,3288
8	6966,3843	6,3527	0,8870	4,4864
9	7654,4905	8,7835	0,9746	6,2031
10	7339,1874	11,5798	0,9345	8,1778

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7724,5966	9,6866	0,9835	6,8408

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9207

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Siloeffekt 20mm #22		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		141,6	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8992	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,7342	0,0000	0,0047	0,0000
1	975,6160	0,5108	0,1242	0,3607
2	1801,8221	0,8125	0,2294	0,5738
3	2727,2687	1,1853	0,3472	0,8371
4	3835,9673	1,7888	0,4884	1,2633
5	4716,4329	2,4919	0,6005	1,7598
6	5571,6227	3,4726	0,7094	2,4524
7	6396,9154	4,7538	0,8145	3,3572
8	7198,5151	6,4349	0,9165	4,5444
9	7895,5940	8,9763	1,0053	6,3392
10	7551,2540	11,6979	0,9615	8,2612

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7947,3959	9,8210	1,0119	6,9358

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9464

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Siloeffekt 20mm #23		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		140,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9075	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	37,0564	0,0000	0,0047	0,0000
1	950,0857	0,7107	0,1210	0,5065
2	1865,1412	1,0178	0,2375	0,7255
3	2791,0174	1,3838	0,3554	0,9863
4	3896,8414	1,9980	0,4962	1,4241
5	4792,7189	2,7537	0,6102	1,9627
6	5644,5854	3,8007	0,7187	2,7090
7	6475,4007	5,2055	0,8245	3,7103
8	7283,0844	7,0741	0,9273	5,0421
9	7931,1436	9,8402	1,0098	7,0137
10	7565,4069	12,7968	0,9633	9,1211

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7962,2128	10,4852	1,0138	7,4734

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9243

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Siloeffekt 20mm #24		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		140,2	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9082	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	46,1188	0,0000	0,0059	0,0000
1	951,6767	0,5062	0,1212	0,3610
2	1728,5019	0,7989	0,2201	0,5699
3	2830,2805	1,3239	0,3604	0,9443
4	3688,2310	1,9211	0,4696	1,3703
5	4546,2838	2,7859	0,5789	1,9871
6	5349,5126	3,9226	0,6811	2,7979
7	6125,3922	5,3737	0,7799	3,8329
8	6883,4986	7,3089	0,8764	5,2132
9	7393,1645	10,0713	0,9413	7,1835
10	7027,7432	12,9473	0,8948	9,2349

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7396,6282	10,2751	0,9418	7,3289

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8631

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Siloeffekt 5mm #50		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		140,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9075	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,4844	0,0003	0,0049	0,0002
1	4113,6133	0,7651	0,5238	0,5453
2	10115,6726	1,4411	1,2880	1,0272
3	14769,9131	2,1171	1,8806	1,5090
4	18108,1433	2,7931	2,3056	1,9908
5	20575,3756	3,4691	2,6197	2,4727
6	22583,5278	4,2098	2,8754	3,0005
7	25040,0845	5,5277	3,1882	3,9399
8	27016,7685	7,1944	3,4399	5,1279
9	28885,0848	9,9417	3,6778	7,0860
10	30209,0723	8,4375	3,8463	6,0139

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
30321,4644	14,9445	3,8606	10,6518

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,4171

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Siloeffekt 5mm #51		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		141,6	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8992	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,6498	0,0004	0,0057	0,0003
1	4543,6569	0,7403	0,5785	0,5228
2	10511,4729	1,4410	1,3384	1,0177
3	15350,5256	2,1417	1,9545	1,5125
4	18895,2158	2,8424	2,4058	2,0073
5	21505,7766	3,5431	2,7382	2,5022
6	23566,2041	4,2857	3,0005	3,0266
7	26112,2817	5,6041	3,3247	3,9577
8	28176,1160	7,2800	3,5875	5,1412
9	30137,2495	10,0236	3,8372	7,0788
10	31616,9520	8,8236	4,0256	6,2313

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31718,6311	14,9928	4,0385	10,5881

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,5612

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Siloeffekt 5mm #52		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		140,5	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9062	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	32,2284	0,0004	0,0041	0,0003
1	4575,6233	0,8317	0,5826	0,5920
2	11047,8809	1,5167	1,4067	1,0795
3	15924,3143	2,2017	2,0275	1,5670
4	19403,8866	2,8867	2,4706	2,0546
5	21950,9525	3,5716	2,7949	2,5421
6	23978,1685	4,3015	3,0530	3,0615
7	26462,3666	5,6058	3,3693	3,9899
8	28476,4010	7,2770	3,6257	5,1794
9	30370,4297	10,0167	3,8669	7,1293
10	31780,8260	8,4375	4,0465	6,0054

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31888,6417	14,9476	4,0602	10,6389

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,5927

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Siloeffekt 20mm #53	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	141,8	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8979	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	38,6258	0,0003	0,0049	0,0002
1	2671,2950	0,7564	0,3401	0,5334
2	8083,1000	1,4164	1,0292	0,9989
3	12217,5531	2,0764	1,5556	1,4643
4	15272,3042	2,7364	1,9445	1,9298
5	17587,1174	3,3964	2,2393	2,3952
6	19549,4713	4,1340	2,4891	2,9154
7	21956,4181	5,4318	2,7956	3,8306
8	23879,2701	7,0834	3,0404	4,9953
9	25700,7472	9,8509	3,2723	6,9470
10	26931,1722	8,4375	3,4290	5,9503

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
27035,5847	14,9438	3,4423	10,5387

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,0404

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Siloeffekt 20mm #54		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		140,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,9075	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,8226	0,0004	0,0057	0,0003
1	3920,9860	0,7726	0,4992	0,5507
2	9738,7756	1,4746	1,2400	1,0510
3	14530,6499	2,1765	1,8501	1,5513
4	18124,6220	2,8786	2,3077	2,0517
5	20816,9687	3,5805	2,6505	2,5521
6	22914,3560	4,3126	2,9175	3,0739
7	25456,1330	5,5919	3,2412	3,9857
8	27539,6900	7,2673	3,5065	5,1798
9	29491,4516	10,0133	3,7550	7,1370
10	30985,9940	8,8236	3,9453	6,2891

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31082,0352	14,9915	3,9575	10,6853

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,4721

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Siloeffekt 20mm #55	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	140,2	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,9082	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,2017	0,0003	0,0044	0,0002
1	5556,2257	0,7197	0,7074	0,5134
2	11634,7681	1,3887	1,4814	0,9905
3	15945,2262	2,0576	2,0302	1,4676
4	19105,5147	2,7265	2,4326	1,9447
5	21470,4734	3,3954	2,7337	2,4219
6	23460,4670	4,1466	2,9871	2,9576
7	25859,0736	5,4707	3,2925	3,9021
8	27810,0723	7,1868	3,5409	5,1261
9	29652,4031	10,0533	3,7755	7,1707
10	31012,7339	8,4375	3,9487	6,0182

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31113,9996	14,9441	3,9616	10,6591

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,5188

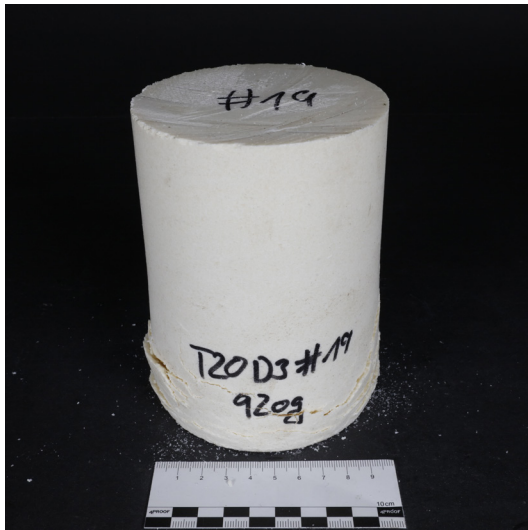
Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

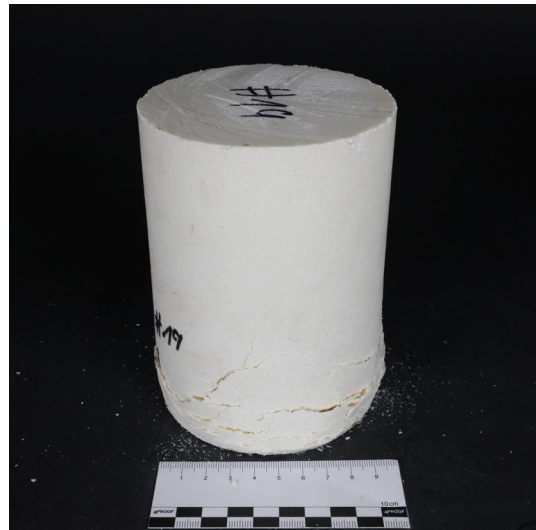
zusätzliche Anmerkungen:

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
Fotos der Prüfkörper



T20 D3 Siloeffekt 5mm #19.1



T20 D3 Siloeffekt 5mm #19.2



T20 D3 Siloeffekt 5mm #19.3



T20 D3 Siloeffekt 5mm #19.4



T20 D3 Siloeffekt 5mm #20.1



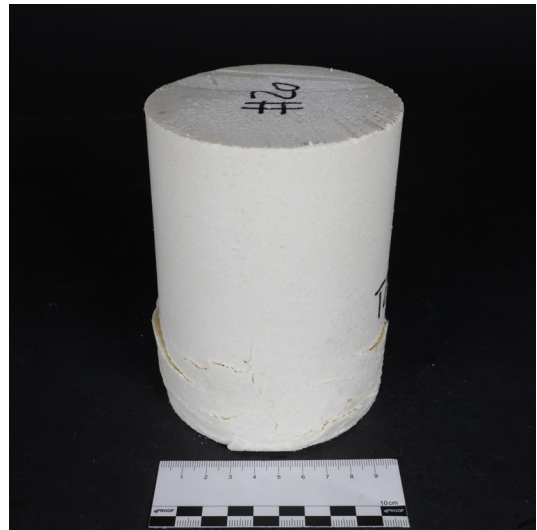
T20 D3 Siloeffekt 5mm #20.2

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
Fotos der Prüfkörper



T20 D3 Siloeffekt 5mm #20.3



T20 D3 Siloeffekt 5mm #20.4



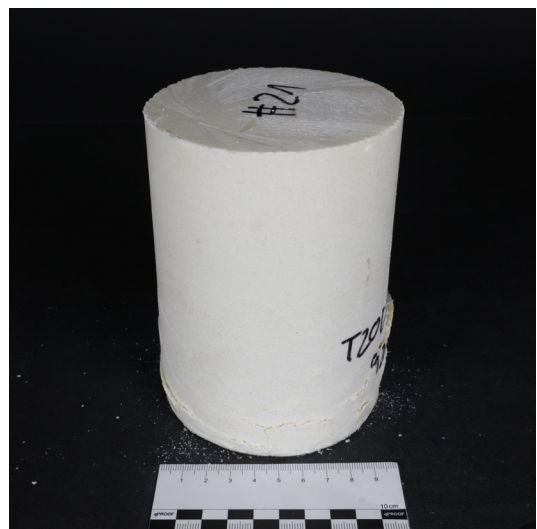
T20 D3 Siloeffekt 5mm #21.1



T20 D3 Siloeffekt 5mm #21.2



T20 D3 Siloeffekt 5mm #21.3



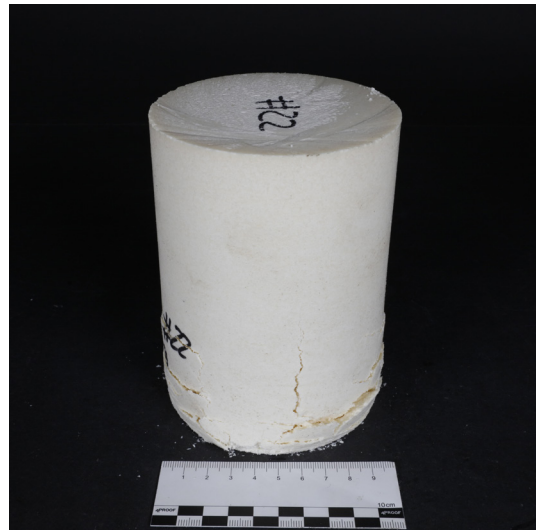
T20 D3 Siloeffekt 5mm #21.4

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

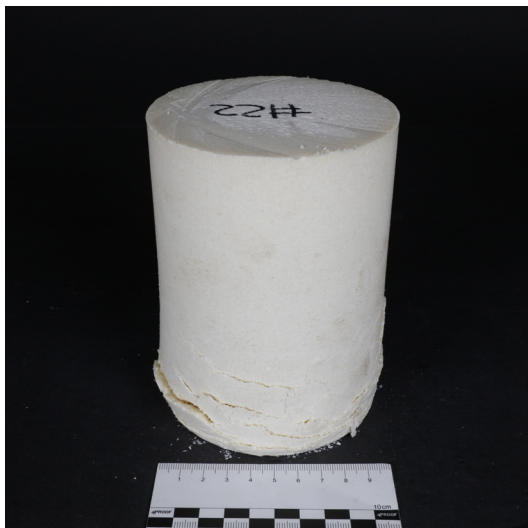
Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
Fotos der Prüfkörper



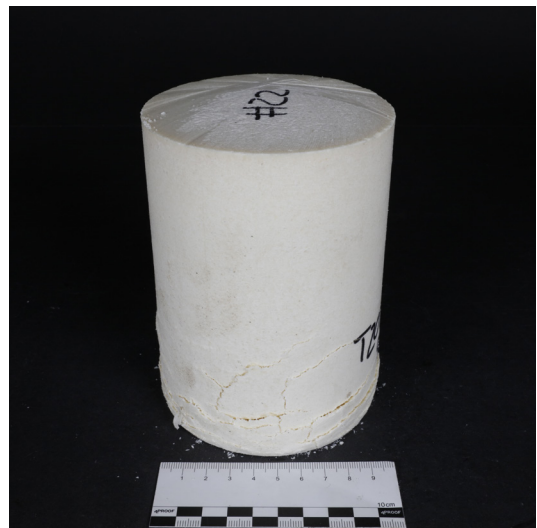
T20 D3 Siloeffekt 20mm #22.1



T20 D3 Siloeffekt 20mm #22.2



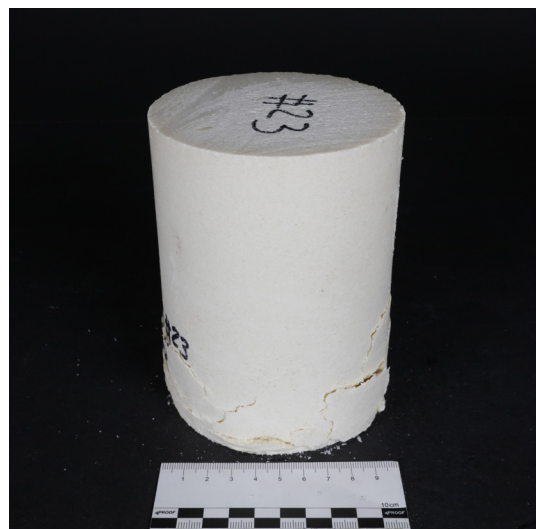
T20 D3 Siloeffekt 20mm #22.3



T20 D3 Siloeffekt 20mm #22.4



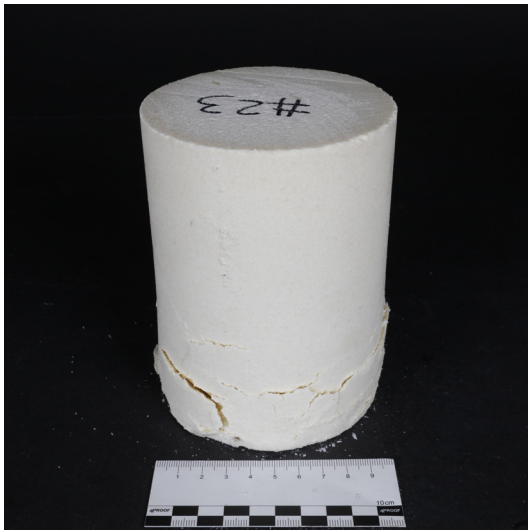
T20 D3 Siloeffekt 20mm #23.1



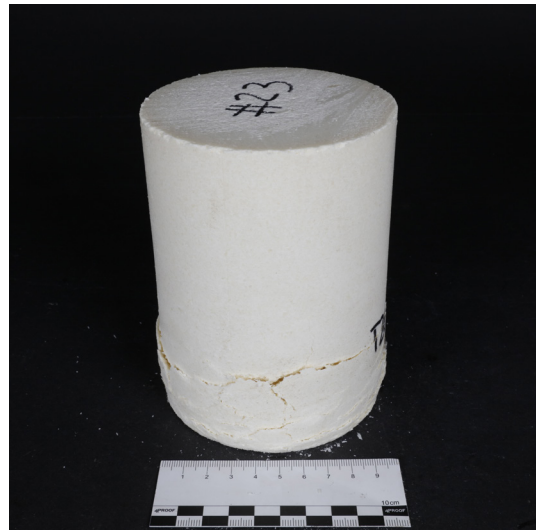
T20 D3 Siloeffekt 20mm #23.2

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
Fotos der Prüfkörper



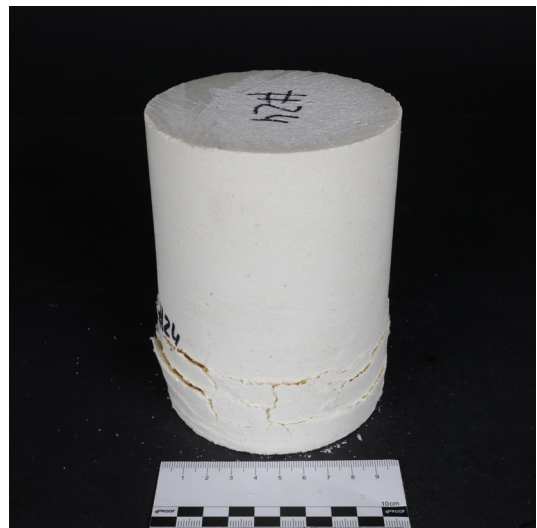
T20 D3 Siloeffekt 20mm #23.3



T20 D3 Siloeffekt 20mm #23.4



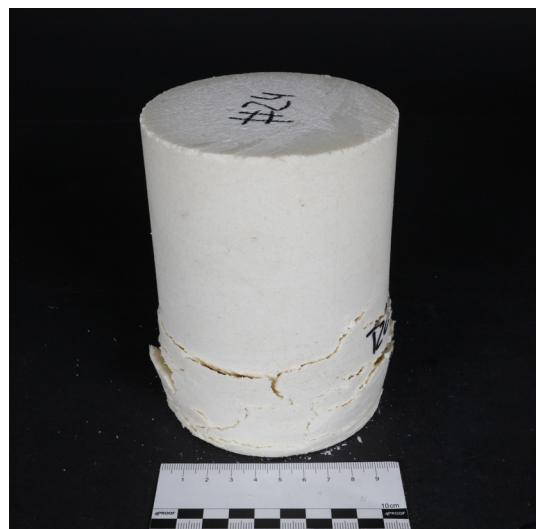
T20 D3 Siloeffekt 20mm #24.1



T20 D3 Siloeffekt 20mm #24.2



T20 D3 Siloeffekt 20mm #24.3



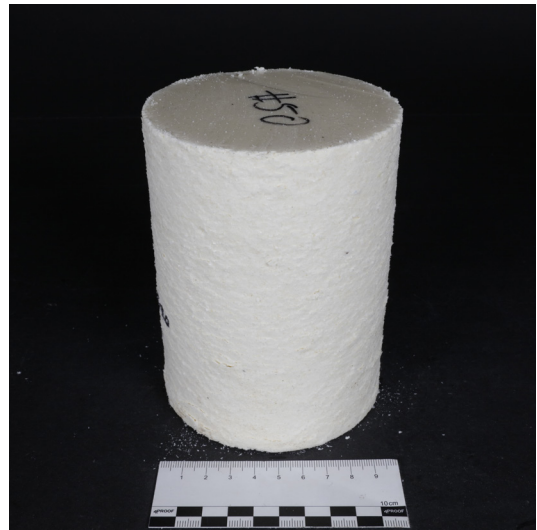
T20 D3 Siloeffekt 20mm #24.4

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
Fotos der Prüfkörper



T40 D5 Siloeffekt 5mm #50.1



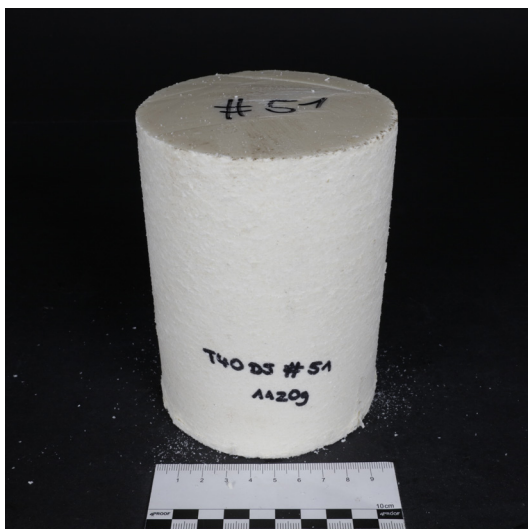
T40 D5 Siloeffekt 5mm #50.2



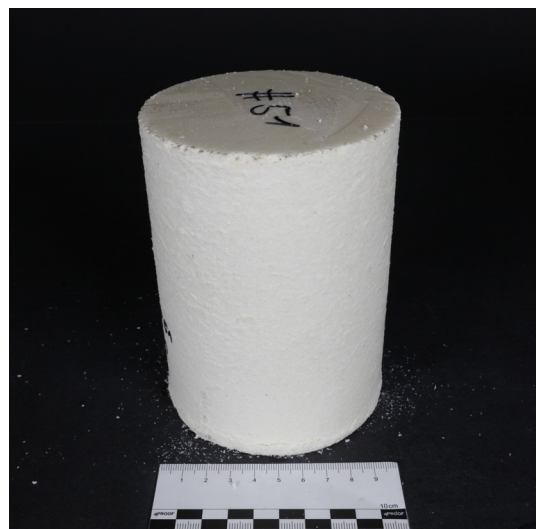
T40 D5 Siloeffekt 5mm #50.3



T40 D5 Siloeffekt 5mm #50.4



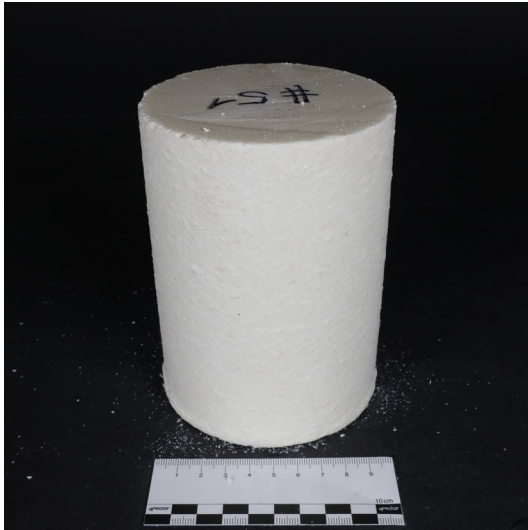
T40 D5 Siloeffekt 5mm #51.1



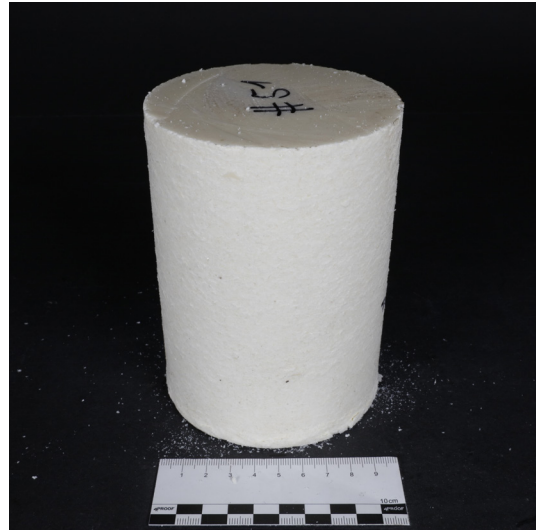
T40 D5 Siloeffekt 5mm #51.2

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

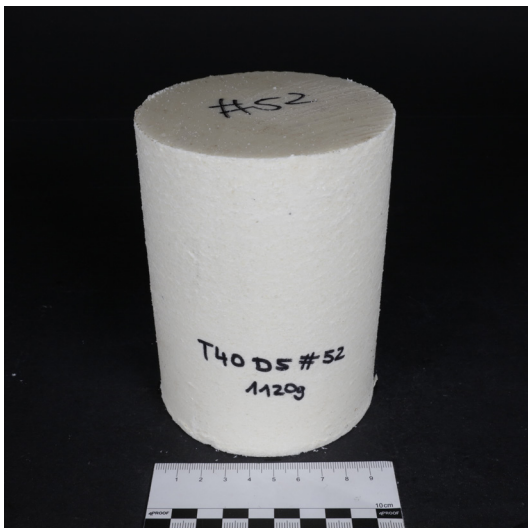
Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
Fotos der Prüfkörper



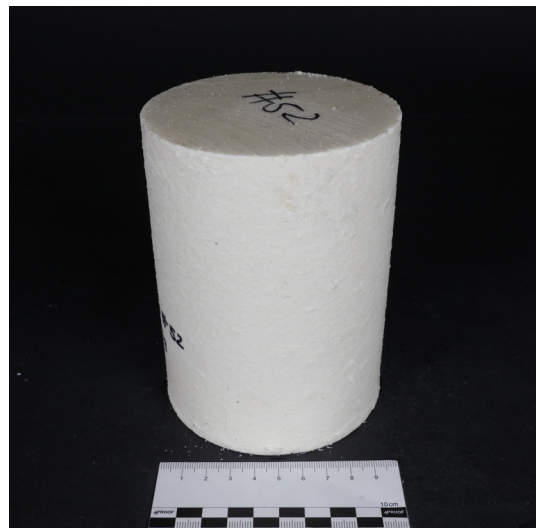
T40 D5 Siloeffekt 5mm #51.3



T40 D5 Siloeffekt 5mm #51.4



T40 D5 Siloeffekt 5mm #52.1



T40 D5 Siloeffekt 5mm #52.2



T40 D5 Siloeffekt 5mm #52.3



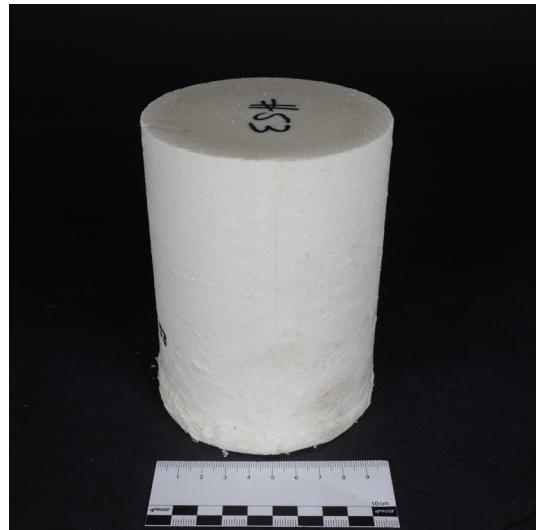
T40 D5 Siloeffekt 5mm #52.4

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
Fotos der Prüfkörper



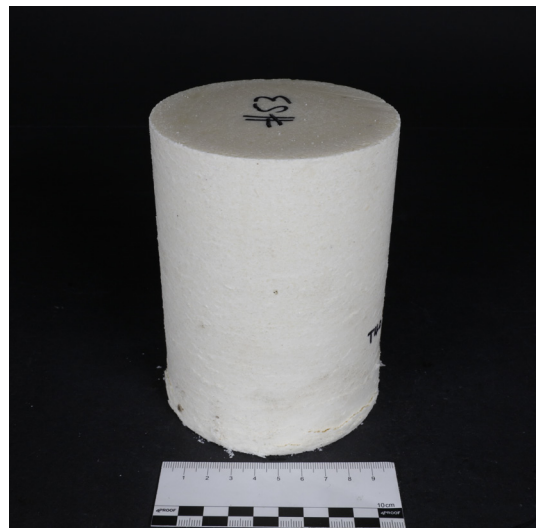
T40 D5 Siloeffekt 20mm #53.1



T40 D5 Siloeffekt 20mm #53.2



T40 D5 Siloeffekt 20mm #53.3



T40 D5 Siloeffekt 20mm #53.4



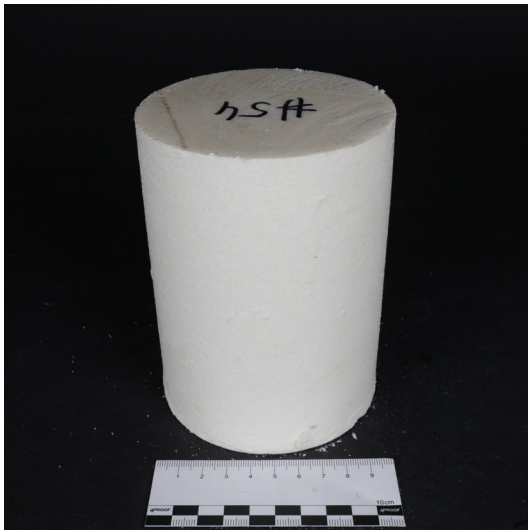
T40 D5 Siloeffekt 20mm #54.1



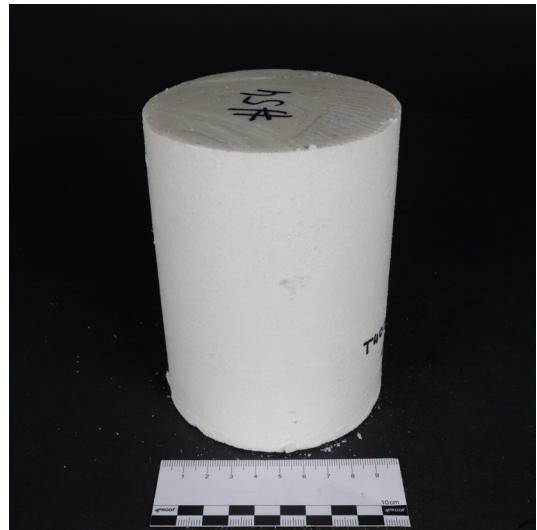
T40 D5 Siloeffekt 20mm #54.2

Anhang K - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.7

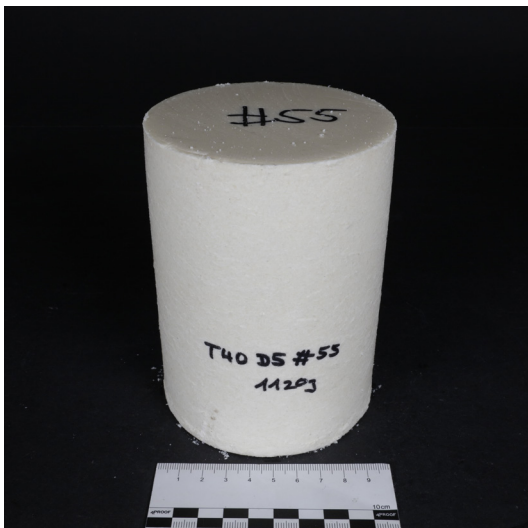
Einfluss der Stempelform auf die Druckfestigkeit
Fotos der Prüfkörper



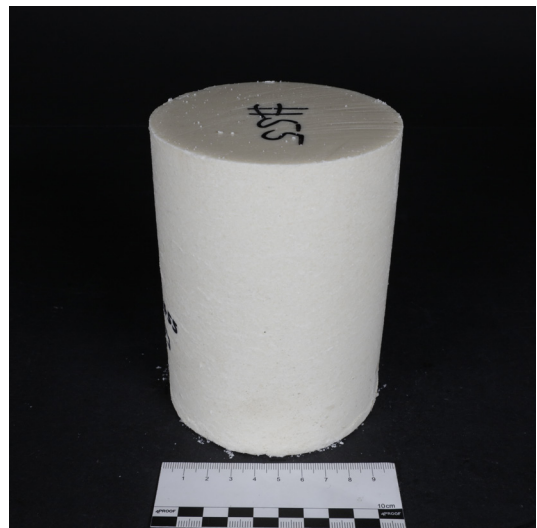
T40 D5 Siloeffekt 20mm #54.3



T40 D5 Siloeffekt 20mm #54.4



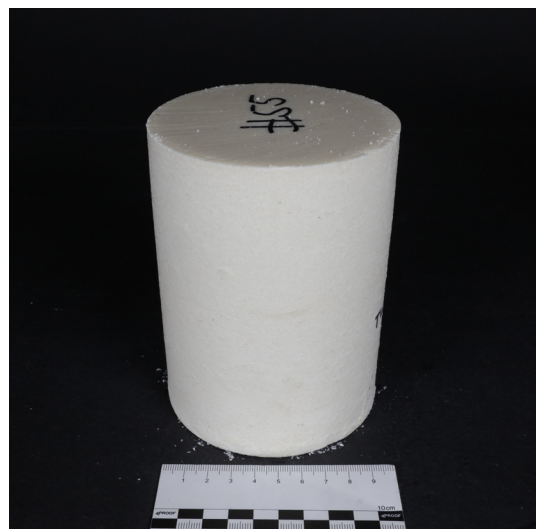
T40 D5 Siloeffekt 20mm #55.1



T40 D5 Siloeffekt 20mm #55.2



T40 D5 Siloeffekt 20mm #55.3



T40 D5 Siloeffekt 20mm #55.4

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

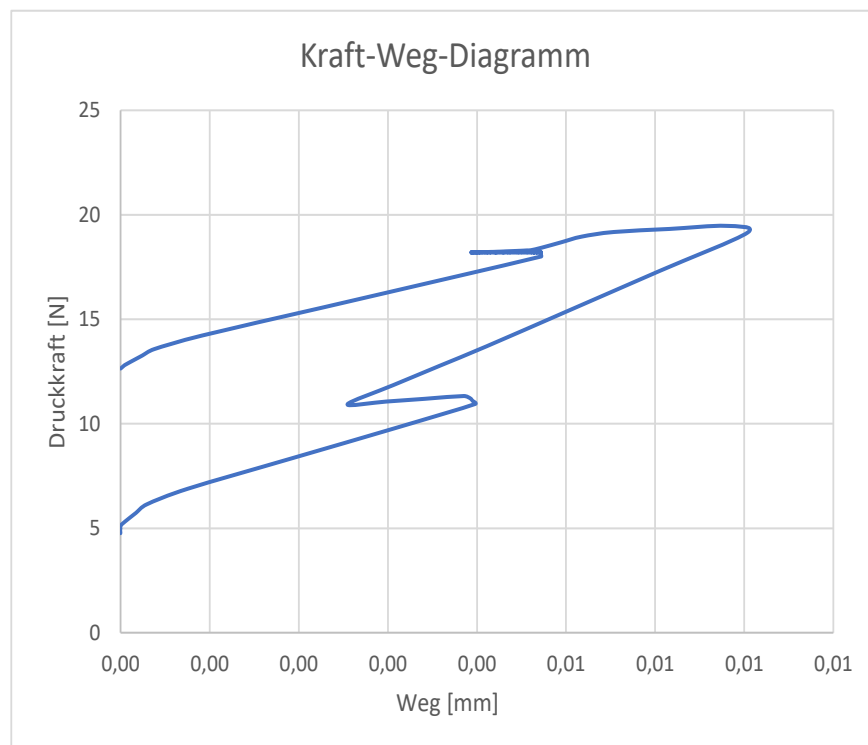
Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
Kupfer 18.2-1	25	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	4,7626	0,0000
1	18,2030	0,0040
2	18,1960	0,0040
3	18,1958	0,0041
4	18,1985	0,0042
5	18,1980	0,0042
6	18,1995	0,0044
7	18,1982	0,0045
8	18,1974	0,0046
9	18,1968	0,0047
10	18,2030	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,0070

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0031



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

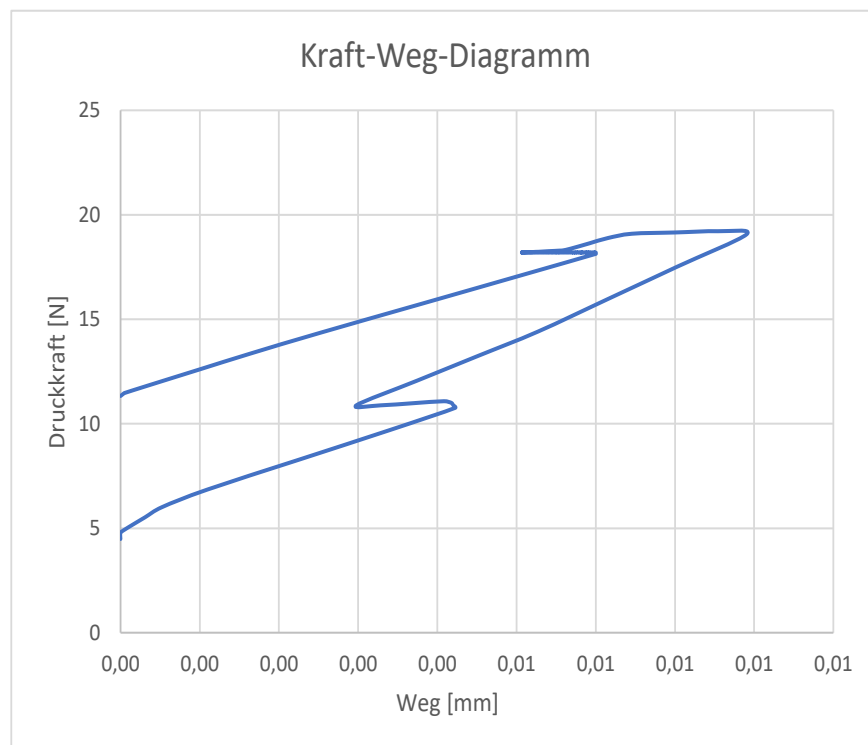
Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
Kupfer 18.2-2	25	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	4,4846	0,0000
1	18,2041	0,0051
2	18,1923	0,0052
3	18,1974	0,0053
4	18,1969	0,0055
5	18,1976	0,0056
6	18,1950	0,0057
7	18,1976	0,0058
8	18,1967	0,0059
9	18,1987	0,0059
10	18,2041	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,0079

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0034



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
Kupfer 18.2-3	25	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	5,0864	0,0000
1	18,1858	0,0061
2	18,1923	0,0063
3	18,1951	0,0065
4	18,1964	0,0066
5	18,1964	0,0067
6	18,1979	0,0068
7	18,1920	0,0069
8	18,1962	0,0071
9	18,1950	0,0072
10	18,1858	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,0074

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0029



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

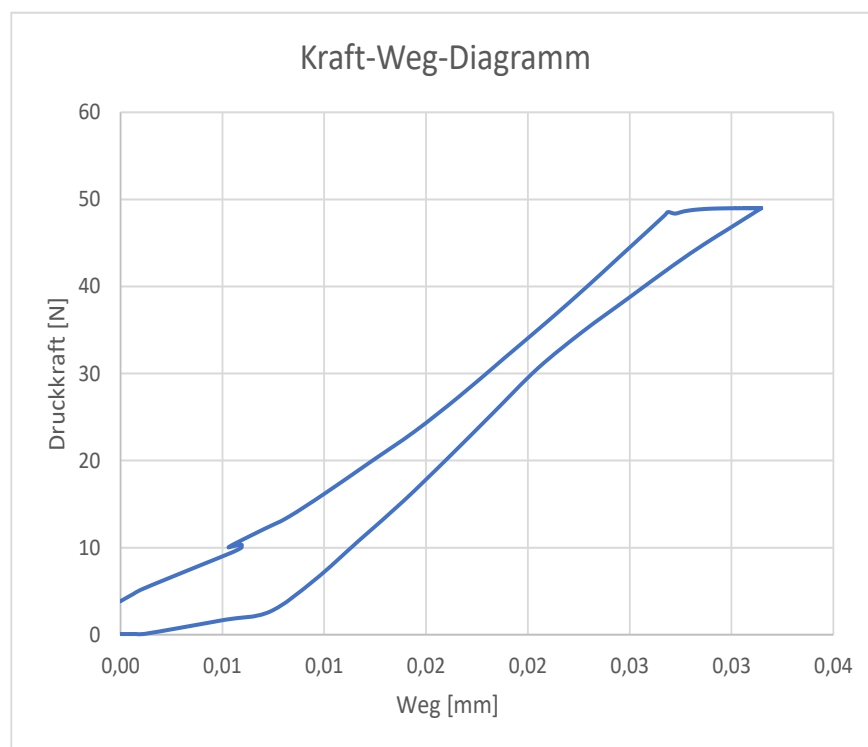
Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
Kupfer 49-1	25	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	3,8562	0,0000
1	48,9486	0,0292
2	48,9830	0,0299
3	48,9849	0,0303
4	48,9904	0,0305
5	48,9915	0,0307
6	48,9922	0,0309
7	48,9943	0,0311
8	48,9944	0,0312
9	48,9929	0,0314
10	48,9486	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,0315

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0055



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

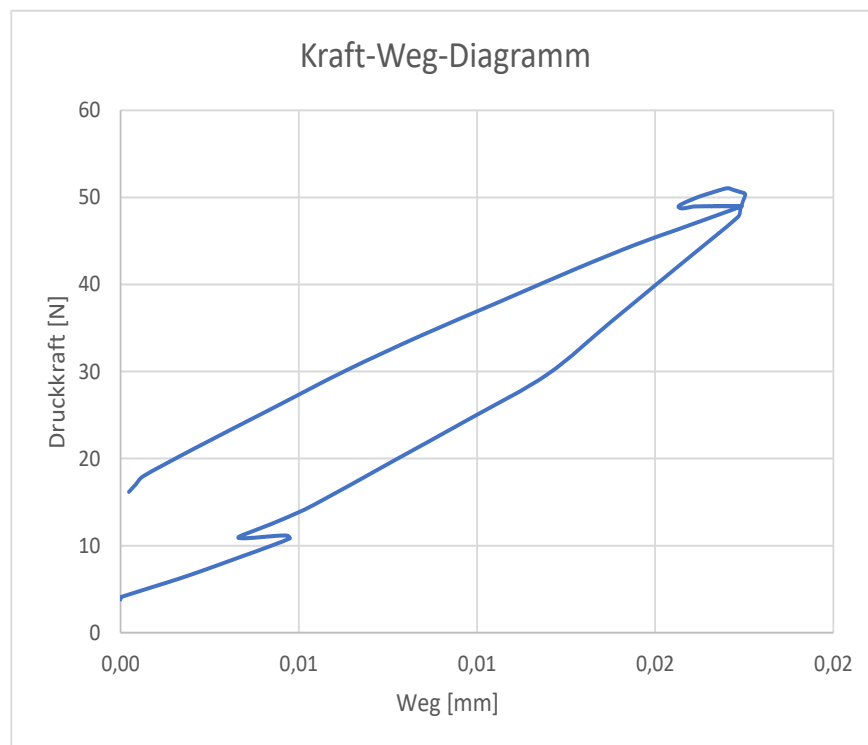
Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
Kupfer 49-2	25	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	3,8256	0,0000
1	48,9651	0,0161
2	48,9851	0,0164
3	48,9886	0,0166
4	48,9894	0,0168
5	48,9931	0,0169
6	48,9913	0,0170
7	48,9922	0,0172
8	48,9911	0,0173
9	48,9931	0,0174
10	48,9651	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,0175

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0042



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

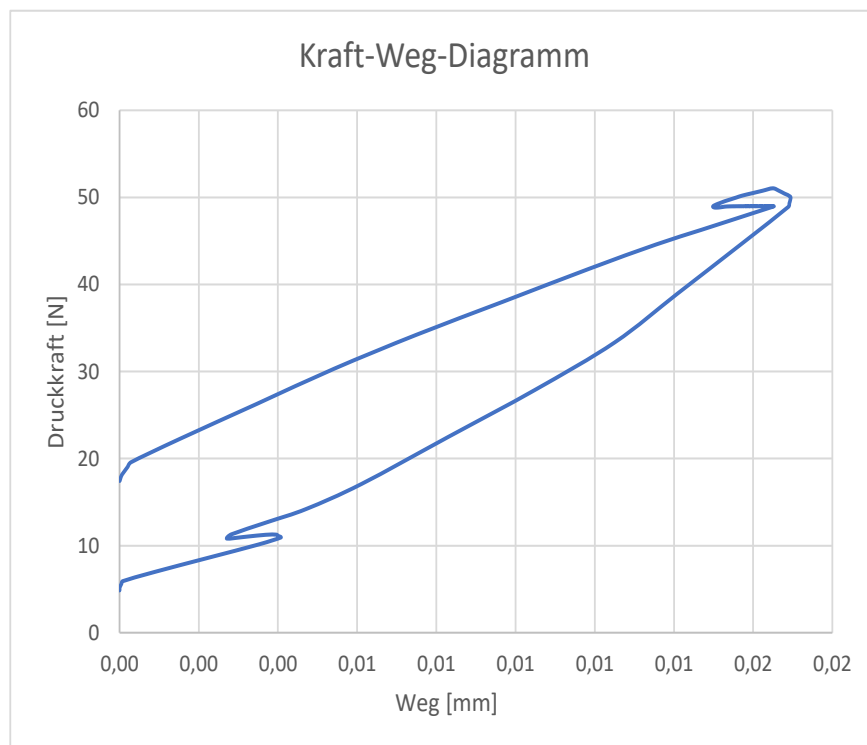
Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
Kupfer 49-3	25	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	4,8582	0,0000
1	48,9640	0,0154
2	48,9855	0,0156
3	48,9912	0,0158
4	48,9932	0,0159
5	48,9914	0,0161
6	48,9939	0,0162
7	48,9940	0,0163
8	48,9925	0,0164
9	48,9928	0,0165
10	48,9640	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,0169

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0022



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

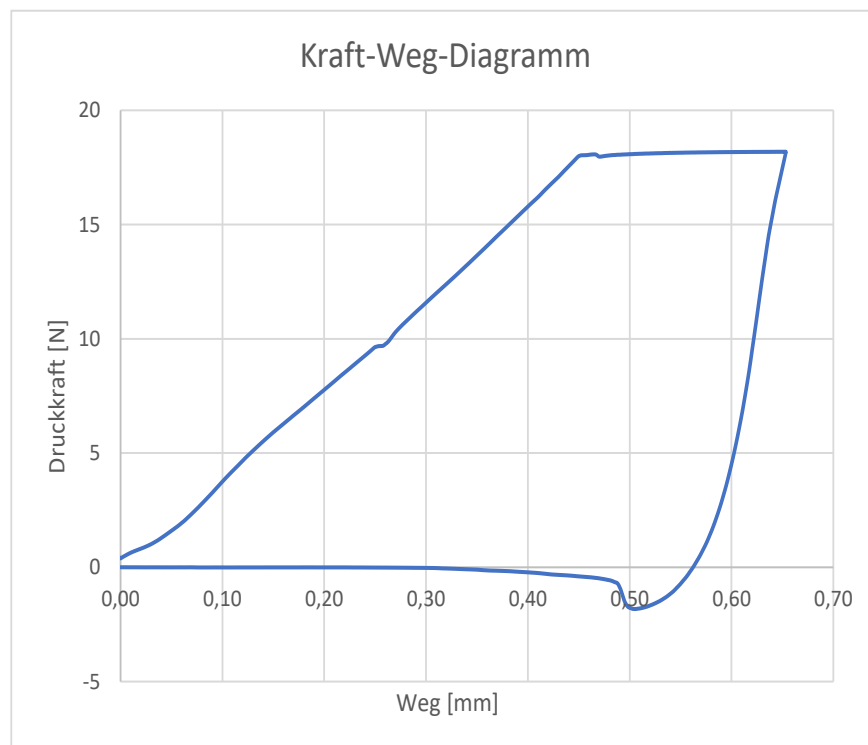
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #1	29,7	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4177	0,0000
1	10,2331	0,2689
2	18,0992	0,5095
3	18,1549	0,5635
4	18,1709	0,5929
5	18,1787	0,6137
6	18,1825	0,6301
7	18,1855	0,6438
8	6,0855	0,6075
9	-0,0195	0,2852
10	10,2331	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,6534

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,2627

E-Modul [N/mm ²]
53,7088



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #2	29,6	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4738	0,0000
1	11,6162	0,2634
2	18,1037	0,4925
3	18,1561	0,5472
4	18,1696	0,5784
5	18,1780	0,6012
6	18,1812	0,6190
7	18,1850	0,6339
8	6,8068	0,5998
9	-0,0383	0,2801
10	11,6162	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,6444

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,2219

E-Modul [N/mm ²]
53,4401



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

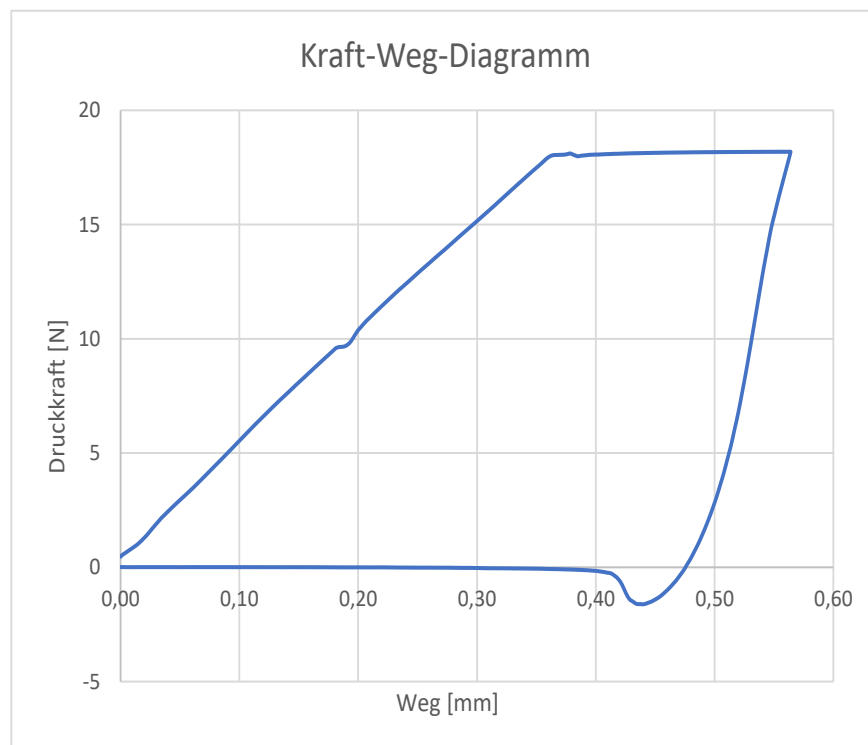
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #3	29,6	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4781	0,0000
1	12,8114	0,2488
2	18,1227	0,4342
3	18,1604	0,4794
4	18,1736	0,5062
5	18,1803	0,5256
6	18,1844	0,5410
7	18,1868	0,5536
8	18,1881	0,5640
9	-0,0164	0,2663
10	12,8114	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,5641

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,1939

E-Modul [N/mm ²]
59,8155



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

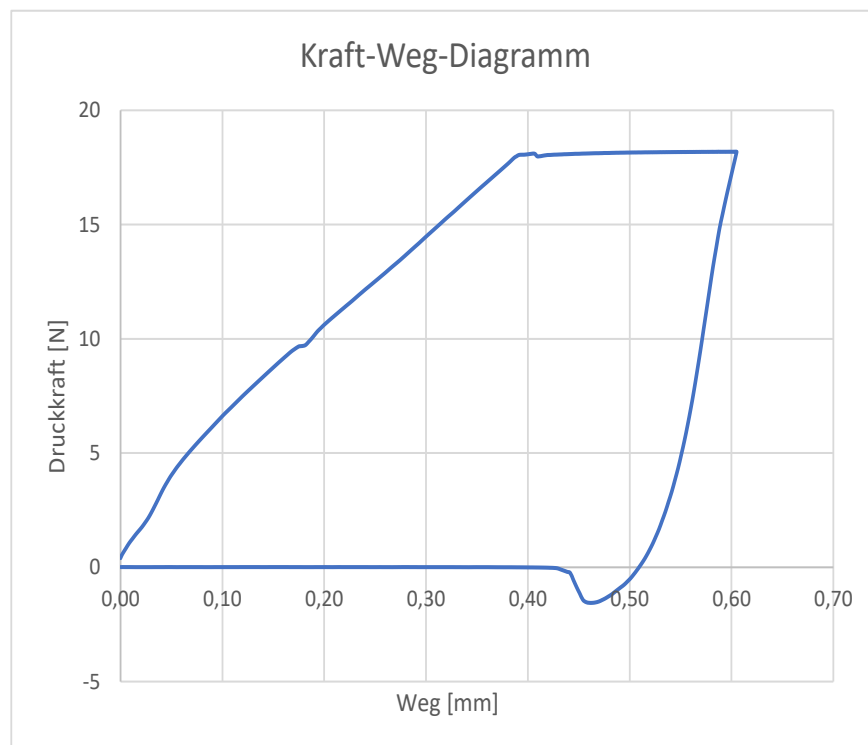
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #4	29,6	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4036	0,0000
1	12,9710	0,2620
2	18,1188	0,4631
3	18,1607	0,5134
4	18,1738	0,5428
5	18,1793	0,5640
6	18,1848	0,5808
7	18,1851	0,5947
8	13,9821	0,5850
9	0,0097	0,2733
10	12,9710	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,6051

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,1872

E-Modul [N/mm ²]
55,6482



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

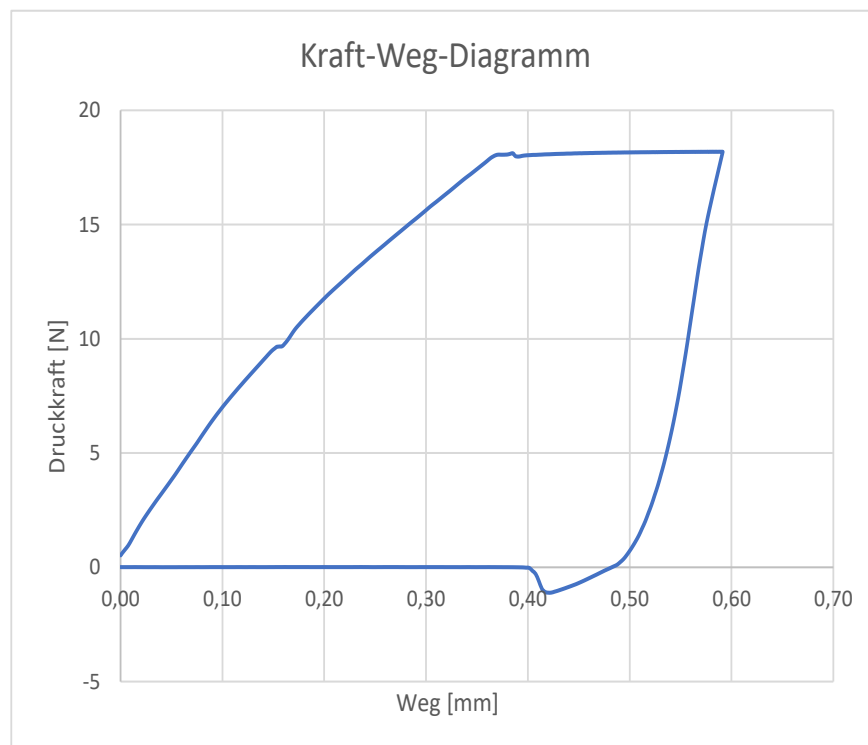
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #5	29,6	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,5394	0,0000
1	13,9829	0,2555
2	18,1173	0,4478
3	18,1580	0,4988
4	18,1719	0,5289
5	18,1791	0,5503
6	18,1831	0,5670
7	18,1868	0,5807
8	15,3549	0,5768
9	0,0106	0,2692
10	13,9829	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,5914

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,1635

E-Modul [N/mm ²]
55,1924



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

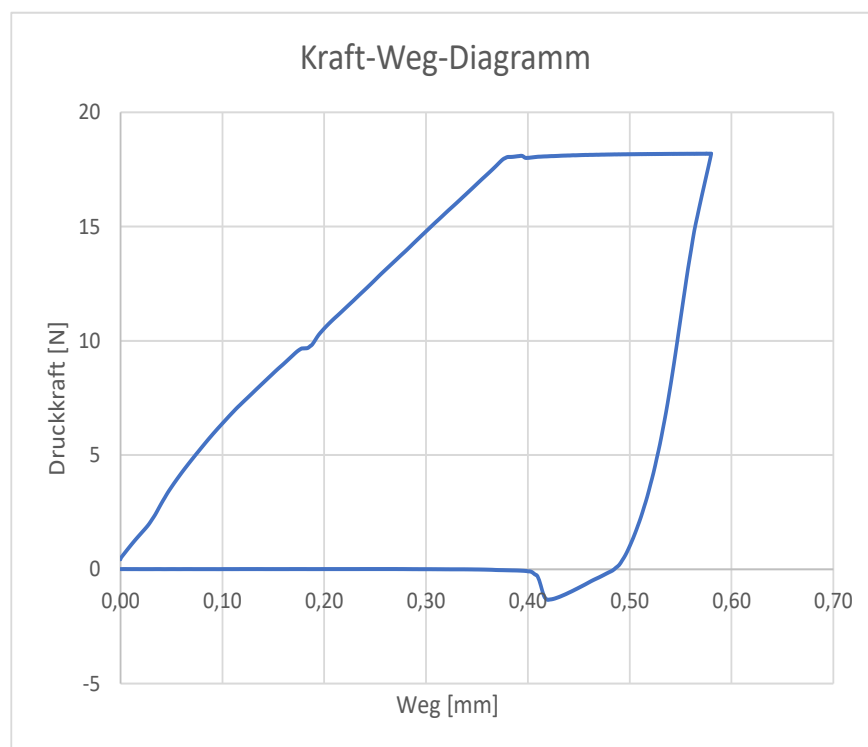
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #6	29,7	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4381	0,0000
1	12,7962	0,2528
2	18,1234	0,4491
3	18,1640	0,4956
4	18,1750	0,5226
5	18,1814	0,5419
6	18,1855	0,5572
7	18,1873	0,5698
8	17,7306	0,5778
9	0,0115	0,2711
10	12,7962	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,5801

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,1883

E-Modul [N/mm ²]
58,0653



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

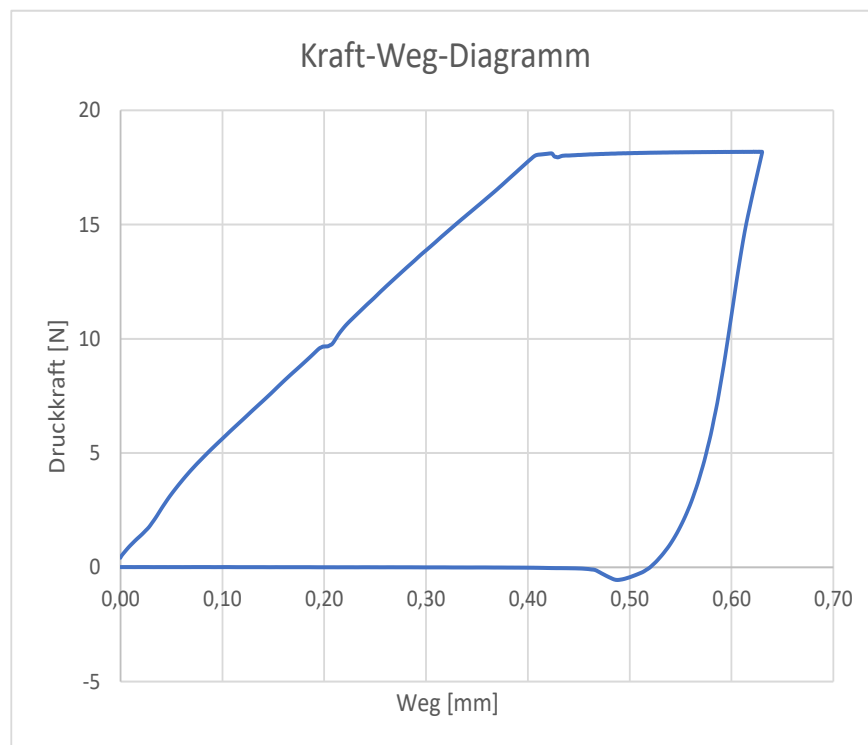
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #7	29,7	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4210	0,0000
1	12,3207	0,2614
2	18,1009	0,4800
3	18,1542	0,5343
4	18,1699	0,5651
5	18,1774	0,5873
6	18,1809	0,6049
7	18,1827	0,6196
8	8,8226	0,5923
9	0,0011	0,2760
10	12,3207	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,6302

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,2108

E-Modul [N/mm ²]
51,5423



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

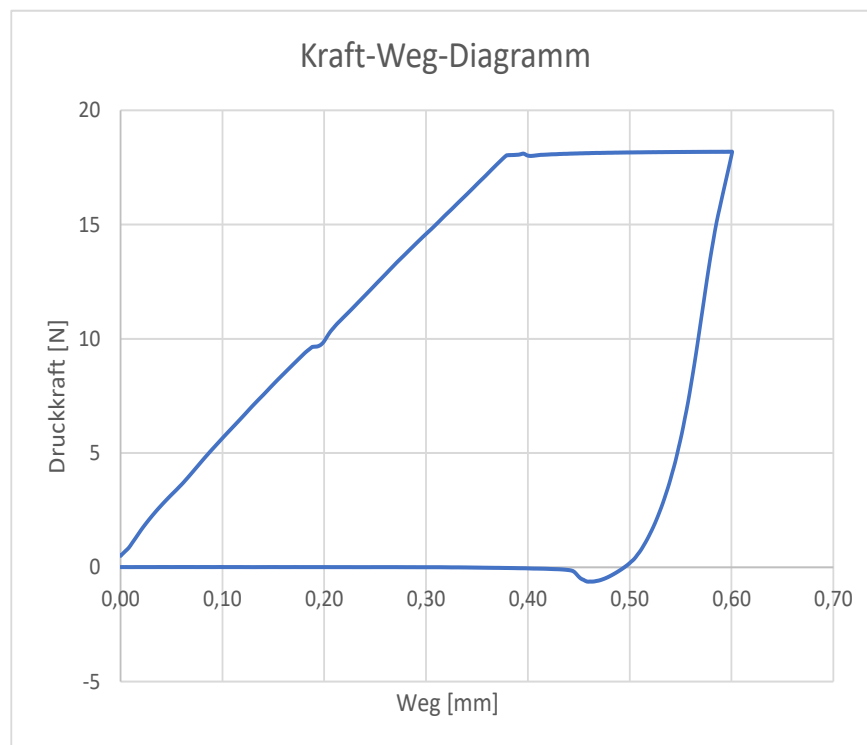
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #8	29,7	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,5196	0,0000
1	12,4766	0,2525
2	18,1194	0,4534
3	18,1594	0,5055
4	18,1741	0,5360
5	18,1800	0,5579
6	18,1837	0,5752
7	18,1857	0,5895
8	15,0883	0,5852
9	0,0074	0,2749
10	12,4766	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,6007

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,1998

E-Modul [N/mm ²]
55,6729



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

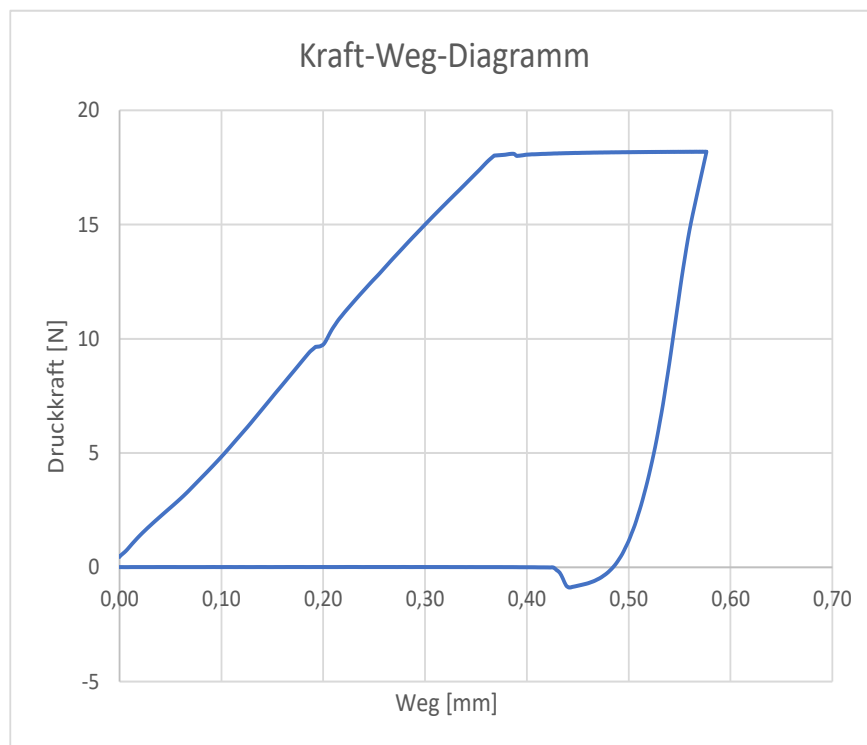
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #9	29,6	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4741	0,0000
1	12,6890	0,2517
2	18,1257	0,4390
3	18,1629	0,4865
4	18,1742	0,5147
5	18,1801	0,5351
6	18,1835	0,5515
7	18,1859	0,5653
8	17,5649	0,5733
9	0,0129	0,2666
10	12,6890	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,5764

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,2026

E-Modul [N/mm ²]
58,3430



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

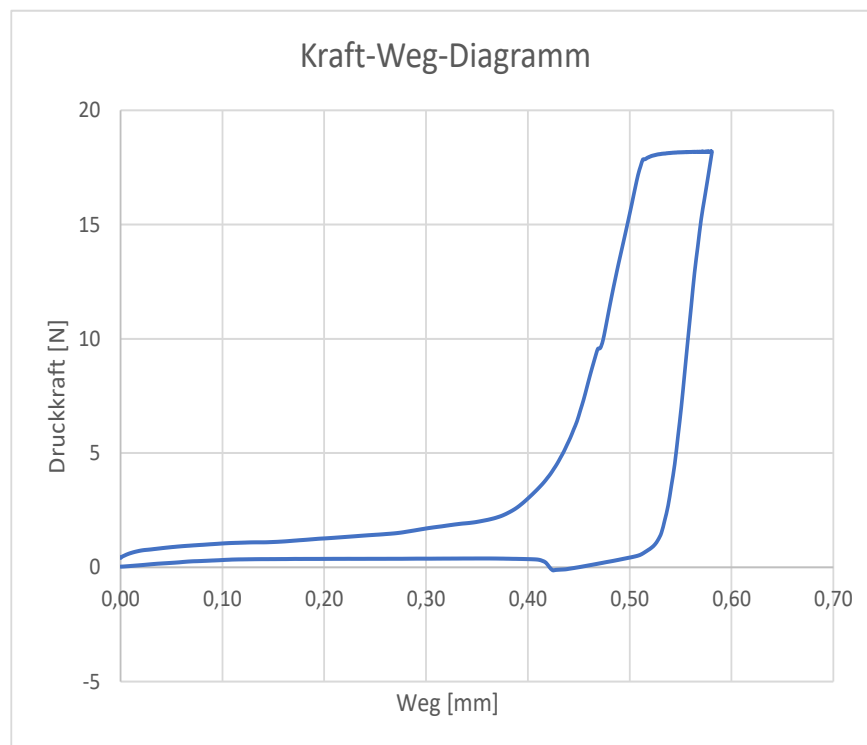
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T20 D3 #10	27	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4305	0,0000
1	1,5723	0,2828
2	18,0748	0,5280
3	18,1636	0,5504
4	18,1792	0,5604
5	18,1836	0,5672
6	18,1858	0,5725
7	18,1883	0,5769
8	18,1902	0,5806
9	0,3787	0,2880
10	1,5723	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,5808

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,4738

E-Modul [N/mm ²]
55,8180



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
T40 D5 #1	26,7	100	7853,98

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,8271	0,0000
1	48,6768	0,1829
2	49,0095	0,2348
3	49,0037	0,2596
4	49,0015	0,2769
5	49,0014	0,2902
6	49,0002	0,3010
7	49,0008	0,3105
8	49,0000	0,3186
9	2,0892	0,2326
10	48,6768	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,3229

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0332

E-Modul [N/mm ²]
220,7833



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

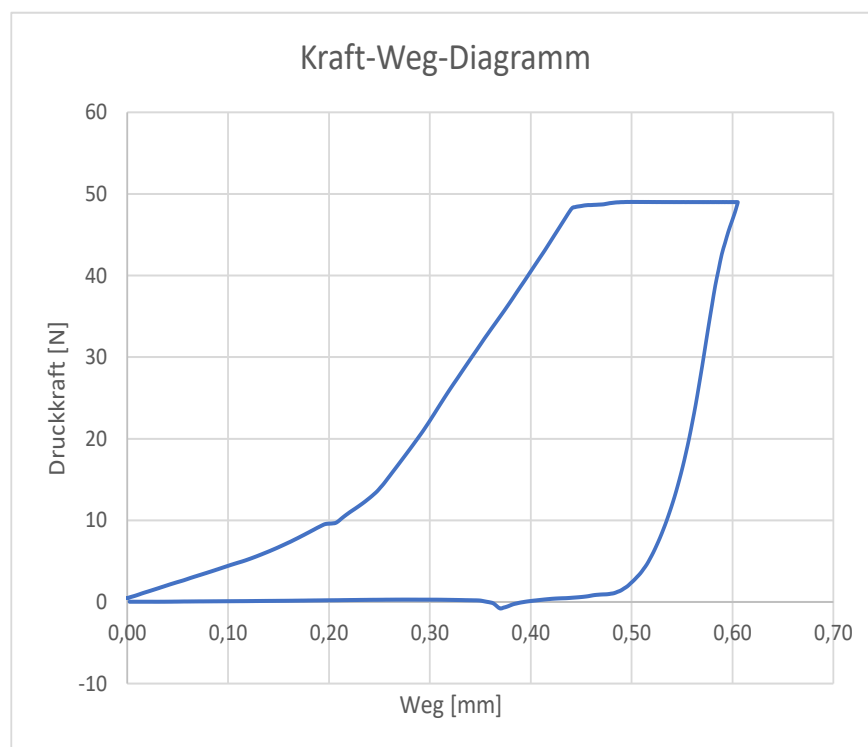
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #2	26,9	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4898	0,0000
1	16,5700	0,2671
2	49,0117	0,4940
3	49,0038	0,5350
4	49,0021	0,5572
5	49,0007	0,5732
6	48,9991	0,5859
7	49,0003	0,5965
8	49,0001	0,6053
9	0,2825	0,2922
10	16,5700	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,6054

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,2091

E-Modul [N/mm ²]
139,6841



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #3	26,8	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4747	0,0000
1	22,9621	0,2751
2	48,7498	0,5673
3	48,9221	0,6224
4	48,9533	0,6476
5	48,9625	0,6648
6	48,9721	0,6780
7	48,9756	0,6887
8	10,4805	0,6305
9	0,0252	0,2948
10	22,9621	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,6957

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,1755

E-Modul [N/mm ²]
130,4859



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #4	26,6	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4818	0,0000
1	38,4400	0,2263
2	48,8916	0,3351
3	48,9379	0,3621
4	48,9544	0,3794
5	48,9650	0,3923
6	48,9722	0,4026
7	48,9770	0,4113
8	48,9786	0,4188
9	0,0192	0,2529
10	38,4400	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,4212

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0897

E-Modul [N/mm ²]
185,6050



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #5	26,6	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4619	0,0000
1	41,2173	0,2216
2	49,0159	0,3181
3	49,0025	0,3441
4	49,0005	0,3610
5	49,0010	0,3737
6	48,9999	0,3840
7	49,0001	0,3927
8	49,0002	0,4002
9	0,0374	0,2457
10	41,2173	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,4029

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0775

E-Modul [N/mm ²]
193,9271



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #6	26,5	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4645	0,0000
1	40,5764	0,2232
2	49,0138	0,3283
3	49,0047	0,3563
4	49,0008	0,3743
5	49,0009	0,3877
6	49,0007	0,3984
7	49,0005	0,4073
8	49,0008	0,4150
9	-0,3139	0,2555
10	40,5764	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,4177

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0700

E-Modul [N/mm ²]
188,7470



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #7	26,6	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,6287	0,0000
1	41,3337	0,2282
2	49,0131	0,3330
3	49,0015	0,3617
4	49,0010	0,3801
5	49,0005	0,3939
6	49,0002	0,4052
7	49,0018	0,4147
8	48,9999	0,4229
9	0,0034	0,2511
10	41,3337	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,4256

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0622

E-Modul [N/mm ²]
179,4674



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

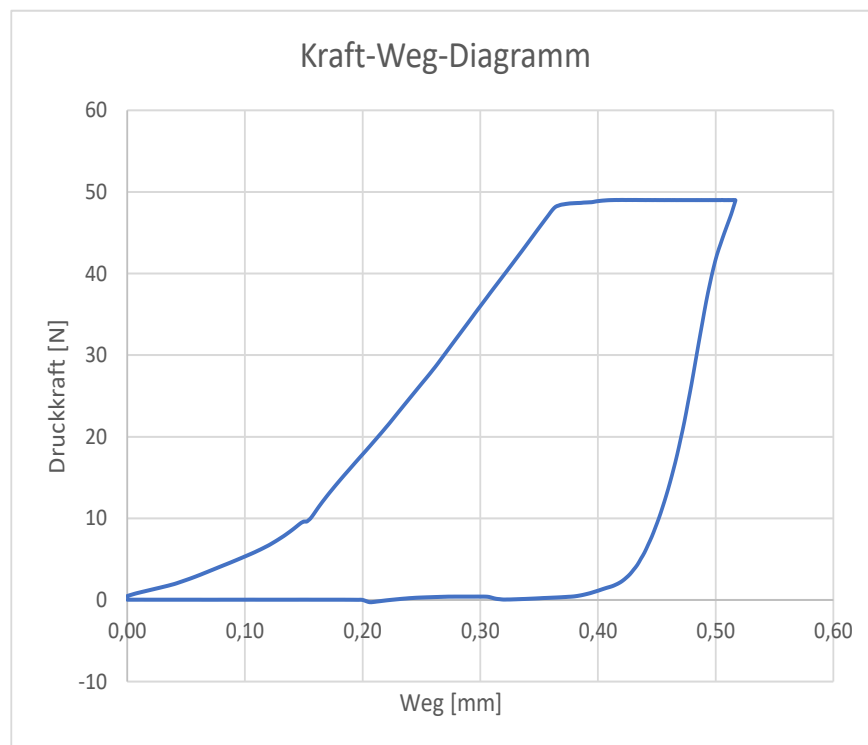
Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #8	26,4	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4839	0,0000
1	26,0470	0,2475
2	49,0166	0,4215
3	49,0048	0,4545
4	49,0024	0,4738
5	49,0010	0,4877
6	49,0000	0,4987
7	48,9994	0,5079
8	49,0001	0,5159
9	0,3825	0,2673
10	26,0470	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,5169

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,1542

E-Modul [N/mm ²]
158,3608



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #9	26,2	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,4636	0,0000
1	23,0220	0,2528
2	49,0142	0,4344
3	49,0017	0,4674
4	49,0011	0,4865
5	49,0002	0,5004
6	49,0014	0,5114
7	49,0013	0,5206
8	48,9782	0,5284
9	0,3952	0,2757
10	23,0220	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,5293

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,1706

E-Modul [N/mm ²]
159,7534



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang L - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.2.3.6

Oberflächenfestigkeit gepresster Wachskörper Versuchsprotokolle

Probekörper:	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]
T40 D5 #10	27,3	100

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]
0	0,6210	0,0000
1	39,6282	0,2314
2	49,0154	0,3436
3	49,0036	0,3728
4	49,0023	0,3911
5	49,0016	0,4044
6	49,0000	0,4153
7	49,0010	0,4244
8	49,0031	0,4323
9	-0,6708	0,2547
10	39,6282	0,0000

maximaler Weg L [mm]
0,4346

Weg L bei $F_0 = 9,8\text{N}$ [mm]
0,0640

E-Modul [N/mm ²]
190,0919



zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Großversuch #10		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		150	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8488	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	41,2775	0,0000	0,0053	0,0000
1	742,6403	0,4626	0,0946	0,3084
2	1501,1147	0,6903	0,1911	0,4602
3	2297,1457	0,9180	0,2925	0,6120
4	3013,8778	1,1457	0,3837	0,7638
5	3635,2584	1,3742	0,4629	0,9161
6	4515,5236	1,7795	0,5749	1,1863
7	5239,8457	2,2352	0,6672	1,4902
8	5908,3774	2,8497	0,7523	1,8998
9	6529,0662	3,8626	0,8313	2,5750
10	6350,4495	5,5545	0,8086	3,7030

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
6684,1665	4,6219	0,8511	3,0813

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8086

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Großversuch #11		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		151,1	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8426	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	42,6178	0,0000	0,0054	0,0000
1	683,1883	0,4463	0,0870	0,2953
2	1377,6971	0,6682	0,1754	0,4422
3	2079,5673	0,8901	0,2648	0,5890
4	2721,7239	1,1119	0,3465	0,7359
5	3352,3091	1,3615	0,4268	0,9010
6	4241,9747	1,8006	0,5401	1,1917
7	4904,0073	2,2498	0,6244	1,4890
8	5557,7430	2,8952	0,7076	1,9161
9	6157,9290	3,9500	0,7841	2,6142
10	5984,3949	5,6997	0,7620	3,7721

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
6298,5092	4,7058	0,8020	3,1143

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7620

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Großversuch #12		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		153,7	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8284	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	45,7873	0,0000	0,0058	0,0000
1	657,5201	0,4370	0,0837	0,2843
2	1158,2610	0,6266	0,1475	0,4077
3	1661,8220	0,8135	0,2116	0,5293
4	2171,0018	1,0158	0,2764	0,6609
5	2949,1419	1,3771	0,3755	0,8960
6	3579,9522	1,7508	0,4558	1,1391
7	4121,1677	2,1797	0,5247	1,4182
8	4650,2153	2,7829	0,5921	1,8106
9	5145,7940	3,7949	0,6552	2,4690
10	4984,3203	5,3119	0,6346	3,4560

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5245,8677	4,4327	0,6679	2,8840

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,6346

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Hammermühle #16		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		149,7	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8505	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	45,1227	0,0000	0,0057	0,0000
1	606,9831	0,4364	0,0773	0,2915
2	1205,8615	0,6150	0,1535	0,4108
3	1880,9008	0,7937	0,2395	0,5302
4	2500,6041	0,9723	0,3184	0,6495
5	3041,2964	1,1509	0,3872	0,7688
6	3558,8636	1,3546	0,4531	0,9049
7	4251,6206	1,7090	0,5413	1,1416
8	4774,4998	2,0931	0,6079	1,3982
9	5284,6454	2,7213	0,6729	1,8179
10	5160,5590	3,8385	0,6571	2,5642

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5431,2525	3,2407	0,6915	2,1648

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,6571

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Hammermühle #17		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		148,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8586	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	42,8328	0,0000	0,0055	0,0000
1	660,5603	0,4456	0,0841	0,3005
2	1297,6722	0,6420	0,1652	0,4329
3	2043,6976	0,8383	0,2602	0,5653
4	2748,1099	1,0347	0,3499	0,6977
5	3365,0558	1,2311	0,4285	0,8301
6	3914,5872	1,4383	0,4984	0,9698
7	4685,7981	1,8159	0,5966	1,2245
8	5270,1486	2,2264	0,6710	1,5013
9	5832,5845	2,8760	0,7426	1,9393
10	5700,0109	4,0902	0,7257	2,7581

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5998,6086	3,4492	0,7638	2,3258

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7257

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Hammermühle #18		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		149,3	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8528	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	43,6063	0,0000	0,0056	0,0000
1	610,0839	0,3899	0,0777	0,2612
2	1309,9350	0,5738	0,1668	0,3843
3	2062,3648	0,7576	0,2626	0,5075
4	2754,7308	0,9415	0,3507	0,6306
5	3351,7828	1,1254	0,4268	0,7538
6	3861,5858	1,3121	0,4917	0,8789
7	4562,9105	1,6419	0,5810	1,0997
8	5122,9775	2,0150	0,6523	1,3496
9	5655,3350	2,5906	0,7201	1,7352
10	5526,5991	3,6630	0,7037	2,4535

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
5816,3713	3,0639	0,7406	2,0522

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7037

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Prallmühle etl.4 #13		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		153,9	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8273	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,3004	0,0000	0,0056	0,0000
1	852,6121	0,5245	0,1086	0,3408
2	1611,3621	0,7883	0,2052	0,5122
3	2330,5415	1,0522	0,2967	0,6837
4	3255,6299	1,4509	0,4145	0,9427
5	4186,0020	1,9786	0,5330	1,2856
6	4946,9073	2,5767	0,6299	1,6743
7	5697,4396	3,4145	0,7254	2,2187
8	6417,7748	4,5708	0,8171	2,9700
9	7093,6682	6,3711	0,9032	4,1398
10	6837,3184	8,7024	0,8706	5,6546

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7196,2377	7,2087	0,9163	4,6840

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,9116

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Prallmühle etl.5 #14		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		155,6	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8183	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	48,9090	0,0000	0,0062	0,0000
1	831,7138	0,4670	0,1059	0,3001
2	1467,8431	0,7260	0,1869	0,4666
3	2229,6835	1,0469	0,2839	0,6728
4	3130,5409	1,4908	0,3986	0,9581
5	3830,8103	1,9346	0,4878	1,2433
6	4480,0333	2,4829	0,5704	1,5957
7	5105,1376	3,2050	0,6500	2,0598
8	5710,1638	4,1705	0,7270	2,6803
9	6288,2386	5,6260	0,8006	3,6157
10	6083,6065	7,4135	0,7746	4,7645

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
6402,2423	6,3931	0,8152	4,1087

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,7746

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T20 D3 Prallmühle etl.6 #15		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		153,6	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8289	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,4239	0,0000	0,0057	0,0000
1	846,8797	0,4879	0,1078	0,3176
2	1581,1873	0,7490	0,2013	0,4876
3	2279,9471	1,0114	0,2903	0,6584
4	3250,5500	1,4405	0,4139	0,9378
5	4156,4536	1,9627	0,5292	1,2778
6	4917,8879	2,5771	0,6262	1,6778
7	5652,8905	3,4166	0,7197	2,2244
8	6364,4223	4,5613	0,8103	2,9696
9	7033,3098	6,3216	0,8955	4,1156
10	6768,3005	8,7082	0,8618	5,6694

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
7123,5920	7,0744	0,9070	4,6057

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
0,8992

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Großversuch #93	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	150,5	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8460	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	41,6168	0,0001	0,0053	0,0001
1	4039,7712	0,8161	0,5144	0,5422
2	10213,9665	1,4886	1,3005	0,9891
3	14535,4844	2,1612	1,8507	1,4360
4	17692,6891	2,8338	2,2527	1,8829
5	20091,2104	3,5064	2,5581	2,3299
6	22057,6822	4,2289	2,8085	2,8099
7	24526,6602	5,5234	3,1228	3,6700
8	26501,1988	7,1660	3,3742	4,7615
9	28355,2083	10,0016	3,6103	6,6456
10	28665,2427	8,4782	3,6498	5,6333

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
29487,7134	15,0084	3,7545	9,9723

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,4140

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Großversuch #94	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	150,2	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8477	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	31,2128	0,0002	0,0040	0,0002
1	3260,4811	0,7749	0,4151	0,5159
2	9310,8559	1,4540	1,1855	0,9680
3	13666,8121	2,1332	1,7401	1,4202
4	16812,3856	2,8123	2,1406	1,8724
5	19203,4317	3,4914	2,4451	2,3245
6	21227,4862	4,2532	2,7028	2,8317
7	23696,7112	5,5765	3,0172	3,7127
8	25675,8750	7,2747	3,2692	4,8433
9	27540,1069	10,2569	3,5065	6,8288
10	27414,5972	8,5468	3,4905	5,6903

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
28566,1547	15,1539	3,6372	10,0892

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,2941

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Großversuch #95	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	148,8	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8557	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	44,1624	0,0003	0,0056	0,0002
1	5380,5825	0,8211	0,6851	0,5518
2	12098,6751	1,5162	1,5405	1,0190
3	16805,9408	2,2114	2,1398	1,4861
4	20212,4948	2,9065	2,5735	1,9533
5	22764,8927	3,6017	2,8985	2,4205
6	24815,6839	4,3400	3,1596	2,9167
7	27344,7104	5,6461	3,4816	3,7944
8	29391,5643	7,3303	3,7423	4,9263
9	31307,9381	10,2068	3,9863	6,8594
10	31659,8384	9,1196	4,0311	6,1287

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
32466,6738	15,4891	4,1338	10,4093

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,7550

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Hammermühle #99	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
	153,1	100	7854
	Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
	1000	0,8316	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	34,8331	0,0001	0,0044	0,0000
1	1852,3017	0,6130	0,2358	0,4004
2	4627,6555	1,1323	0,5892	0,7396
3	8067,4589	1,6517	1,0272	1,0788
4	10901,7112	2,1710	1,3880	1,4180
5	12986,5113	2,6903	1,6535	1,7572
6	14578,8136	3,2096	1,8562	2,0964
7	16380,2575	4,0031	2,0856	2,6147
8	18001,9044	5,0894	2,2921	3,3242
9	19469,2742	6,9883	2,4789	4,5646
10	18852,2752	6,3331	2,4003	4,1365

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
19910,4161	9,3105	2,5351	6,0813

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
2,5092

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Hammermühle #100		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		149,9	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8494	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	48,3422	48,7073	0,0062	32,4932
1	4184,3096	0,8229	0,5328	0,5489
2	11470,4708	1,5302	1,4605	1,0208
3	16500,5338	2,2375	2,1009	1,4927
4	19938,7200	2,9448	2,5387	1,9645
5	22364,8729	3,6522	2,8476	2,4364
6	24729,9976	4,6727	3,1487	3,1172
7	26919,2480	6,2801	3,4275	4,1895
8	28828,1746	9,6106	3,6705	6,4114
9	29168,3005	16,3568	3,7138	10,9118
10	27046,8850	21,1816	3,4437	14,1305

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
29247,3165	13,4176	3,7239	8,9511

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,5498

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Hammermühle #101		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		149,8	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8500	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	36,7635	0,0003	0,0047	0,0002
1	4096,5260	0,7913	0,5216	0,5282
2	10803,0601	1,4732	1,3755	0,9834
3	15472,4783	2,1550	1,9700	1,4386
4	18720,4081	2,8369	2,3836	1,8938
5	21047,7463	3,5188	2,6799	2,3490
6	23296,3175	4,4640	2,9662	2,9800
7	25465,9595	5,9124	3,2424	3,9469
8	27383,4092	8,4059	3,4866	5,6114
9	28414,8808	14,1327	3,6179	9,4344
10	25922,8340	8,6443	3,3006	5,7706

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
28421,3330	13,5951	3,6187	9,0755

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,4185

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Prallmühle #96		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		149,2	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8534	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	47,7601	0,0002	0,0061	0,0002
1	4578,5480	0,7231	0,5830	0,4846
2	10545,4637	1,4343	1,3427	0,9614
3	15235,2276	2,1456	1,9398	1,4381
4	18595,4895	2,8568	2,3677	1,9148
5	21055,3219	3,5681	2,6808	2,3915
6	23232,2293	4,4203	2,9580	2,9627
7	25721,4330	5,8523	3,2750	3,9224
8	27793,0088	7,7487	3,5387	5,1935
9	29746,0944	10,7935	3,7874	7,2343
10	30311,4883	9,0529	3,8594	6,0676

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31279,1112	15,3787	3,9826	10,3074

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,5048

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Prallmühle #97		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		149,7	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8505	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	48,7258	0,0003	0,0062	0,0002
1	5073,9147	0,7275	0,6460	0,4860
2	11449,3740	1,4590	1,4578	0,9746
3	16340,6971	2,1905	2,0806	1,4633
4	19832,2943	2,9220	2,5251	1,9519
5	22381,2276	3,6535	2,8497	2,4405
6	24624,6735	4,5325	3,1353	3,0277
7	27159,4055	6,0014	3,4580	4,0089
8	29295,4075	8,0052	3,7300	5,3475
9	31291,5183	11,2694	3,9842	7,5280
10	31140,8084	8,7689	3,9650	5,8576

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
32677,1287	15,7378	4,1606	10,5129

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,6713

Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Versuchsprotokolle

Probekörper: T40 D5 Prallmühle #98		Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm ²]
		149	100	7854
		Masse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	
		1000	0,8545	

Punkt	Druckkraft F [N]	Weg L [mm]	Druckspannung σ [N/mm ²]	Dehnung ΔL [%]
0	47,1770	0,0003	0,0060	0,0002
1	4296,9067	0,7368	0,5471	0,4945
2	10213,5107	1,4544	1,3004	0,9761
3	15165,6864	2,1720	1,9310	1,4577
4	18726,2434	2,8896	2,3843	1,9393
5	21319,6012	3,6072	2,7145	2,4209
6	23436,9619	4,3986	2,9841	2,9521
7	26002,6338	5,8044	3,3108	3,8956
8	28098,2856	7,6276	3,5776	5,1192
9	30078,2859	10,5558	3,8297	7,0844
10	31036,6932	8,9780	3,9517	6,0255

maximale Druckkraft F_{\max} [N]	Weg L bei F_{\max} [mm]	Druckspannung σ_{\max} [N/mm ²]	Dehnung ΔL bei F_{\max} [%]
31694,4183	15,2019	4,0355	10,2026

Druckspannung σ bei $\Delta L=5\%$ [N/mm ²]
3,5563

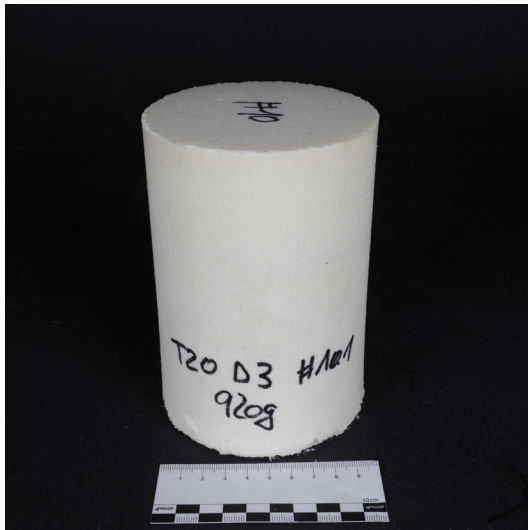
Kraft-Weg-Diagramm

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

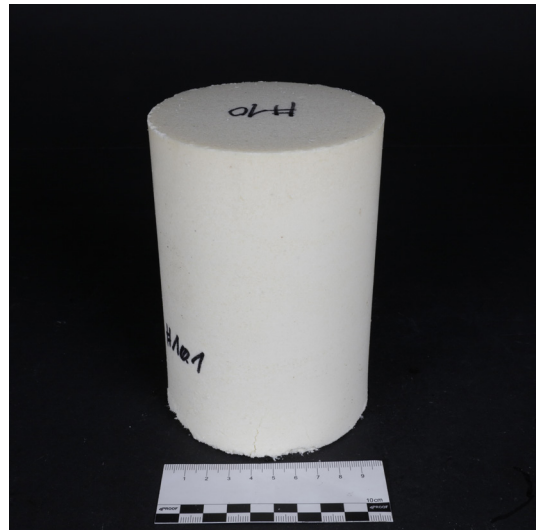
zusätzliche Anmerkungen:

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

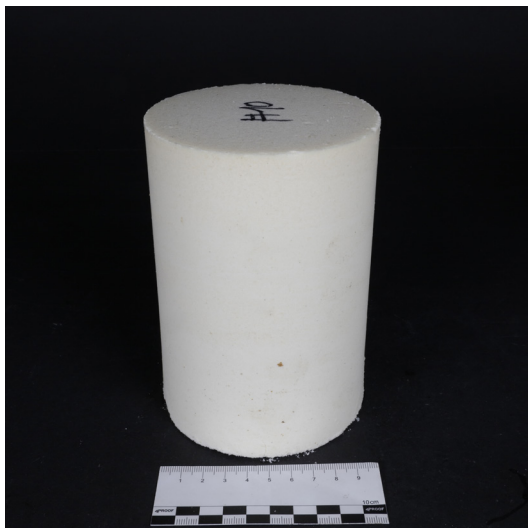
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



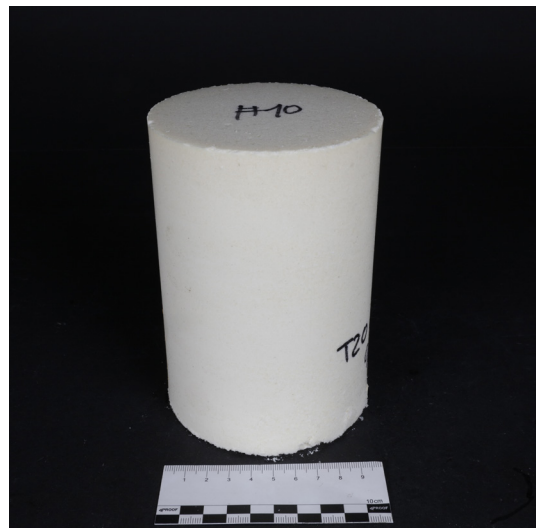
T20 D3 Großversuch #10.1



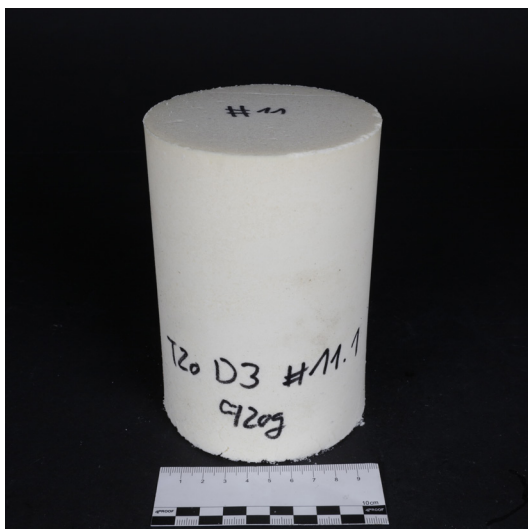
T20 D3 Großversuch #10.2



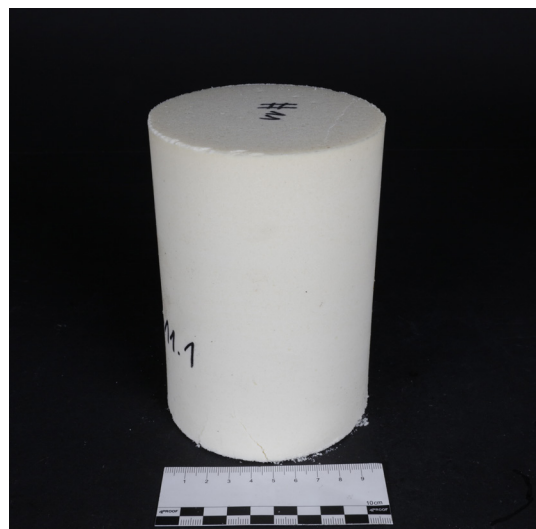
T20 D3 Großversuch #10.3



T20 D3 Großversuch #10.4



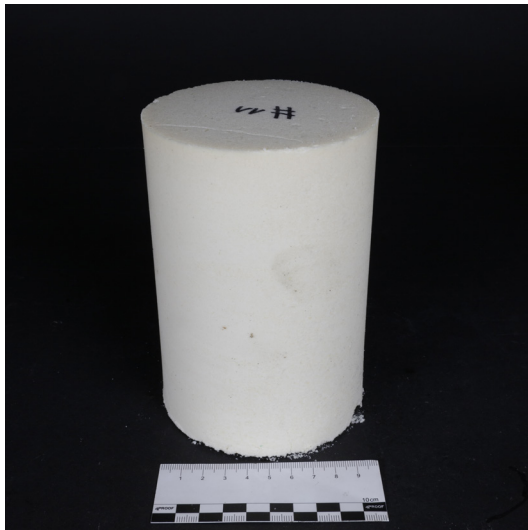
T20 D3 Großversuch #11.1



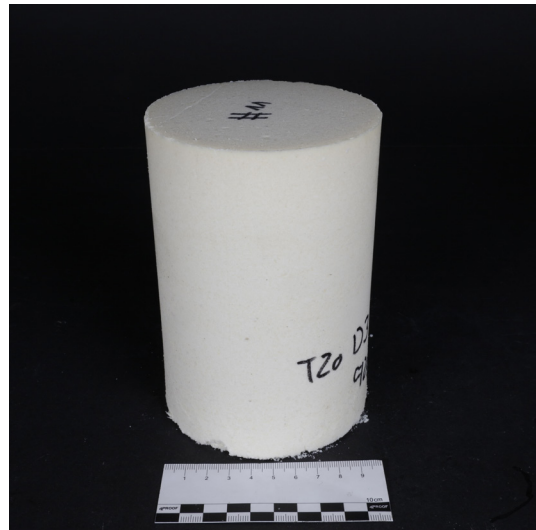
T20 D3 Großversuch #11.2

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

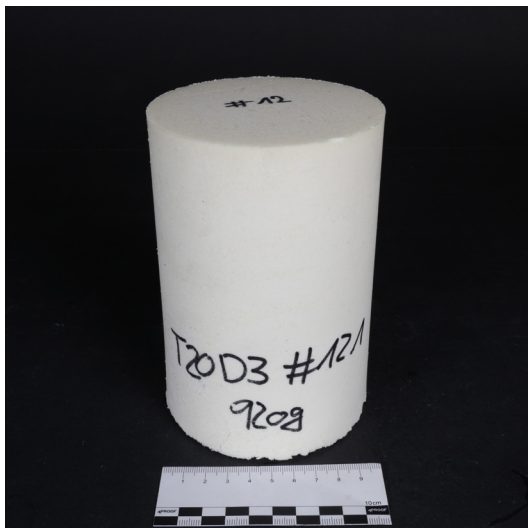
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



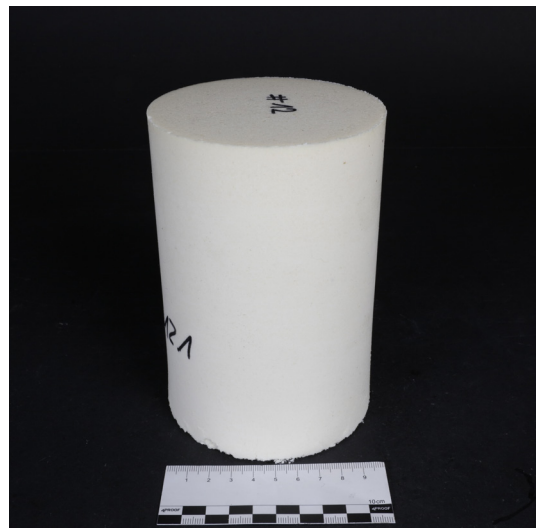
T20 D3 Großversuch #11.3



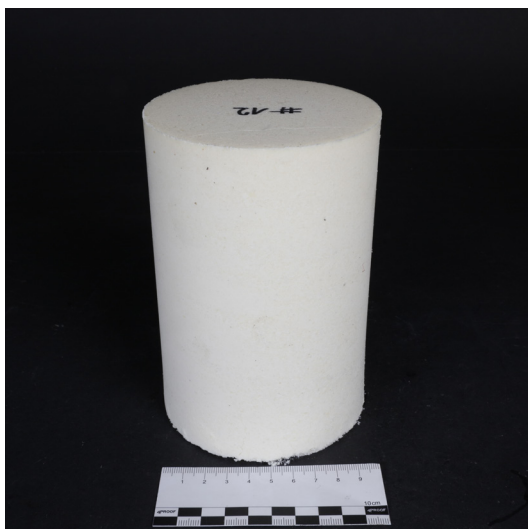
T20 D3 Großversuch #11.4



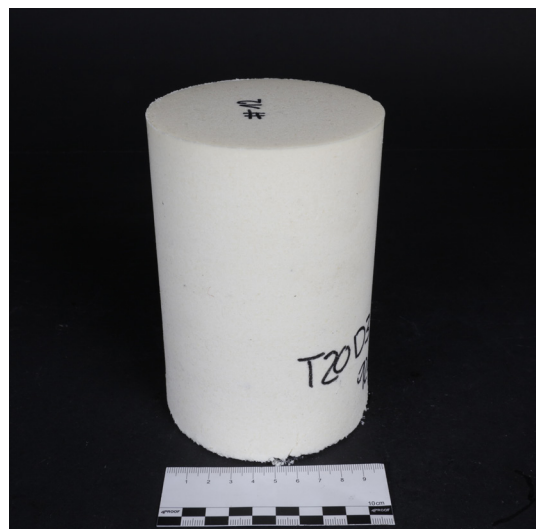
T20 D3 Großversuch #12.1



T20 D3 Großversuch #12.2



T20 D3 Großversuch #12.3



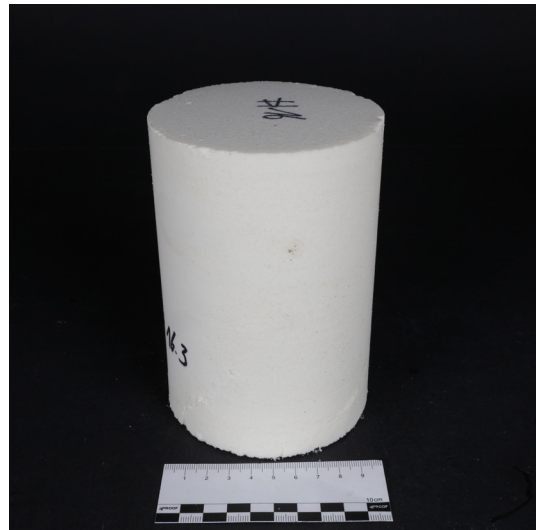
T20 D3 Großversuch #12.4

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

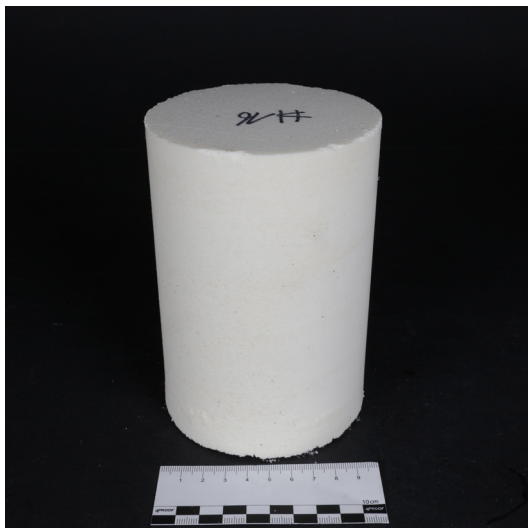
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



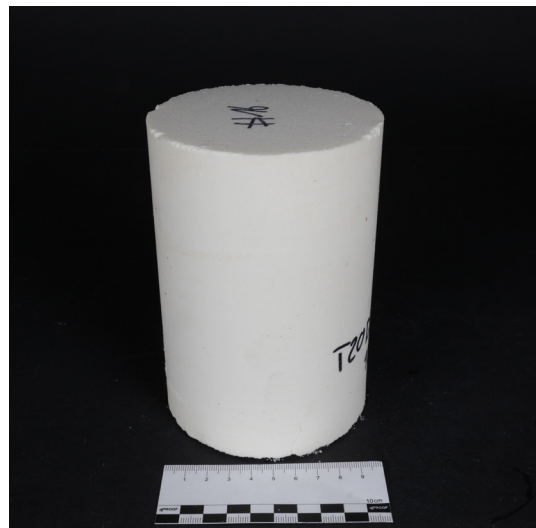
T20 D3 Hammermühle #16.1



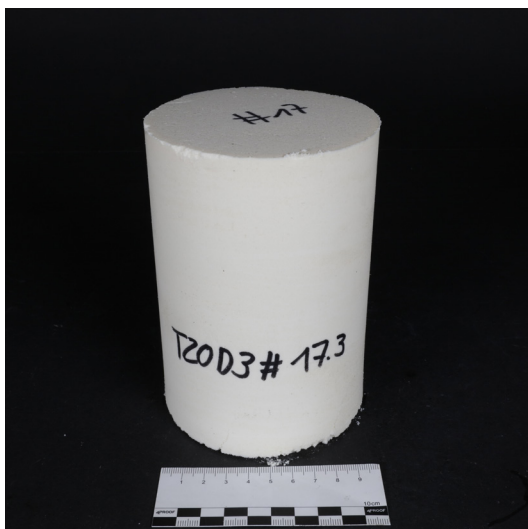
T20 D3 Hammermühle #16.2



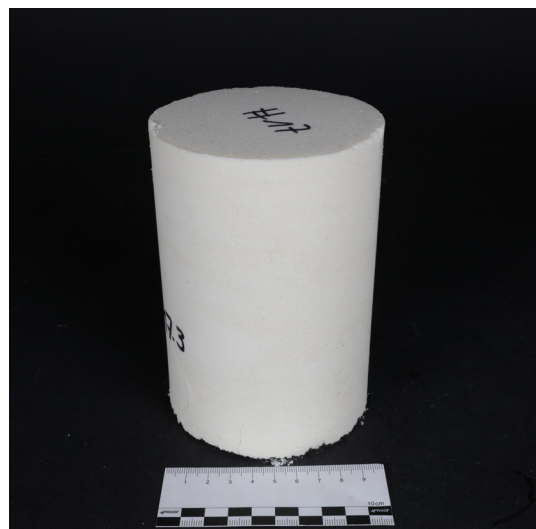
T20 D3 Hammermühle #16.3



T20 D3 Hammermühle #16.4



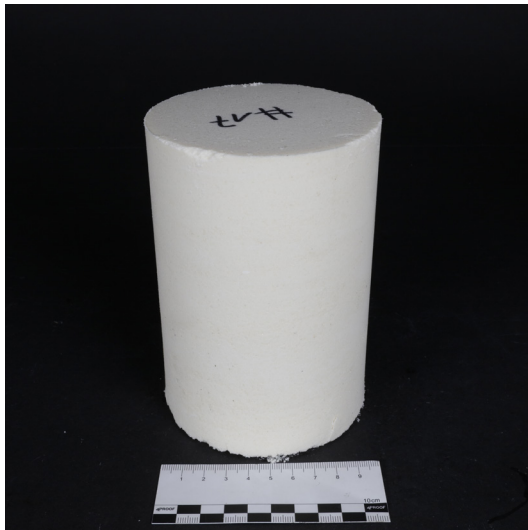
T20 D3 Hammermühle #17.1



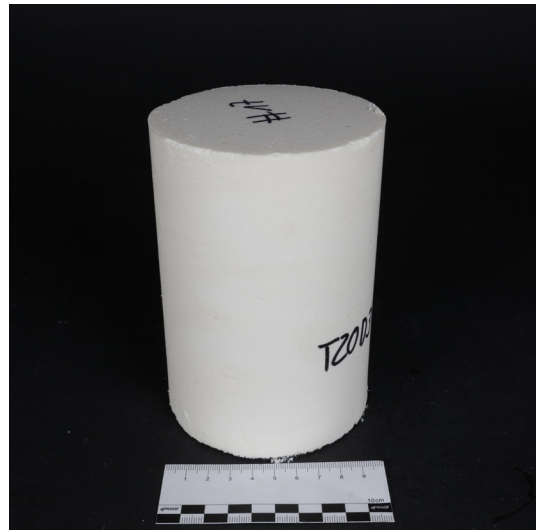
T20 D3 Hammermühle #17.2

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

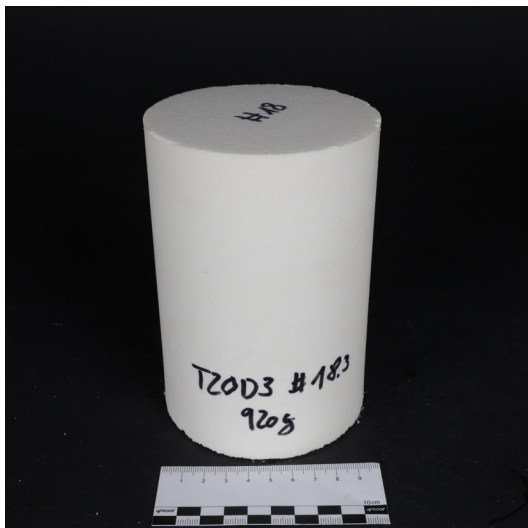
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



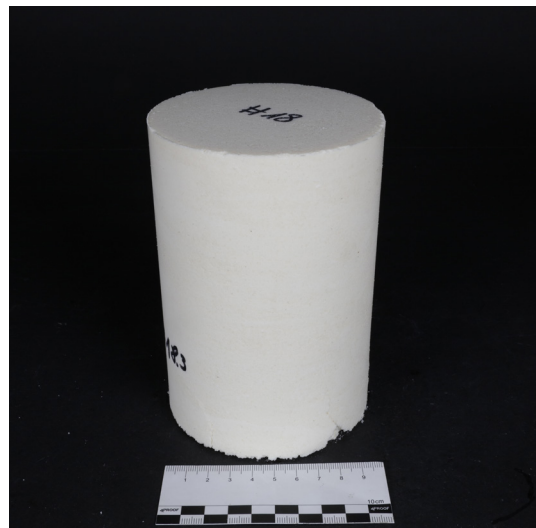
T20 D3 Hammermühle #17.3



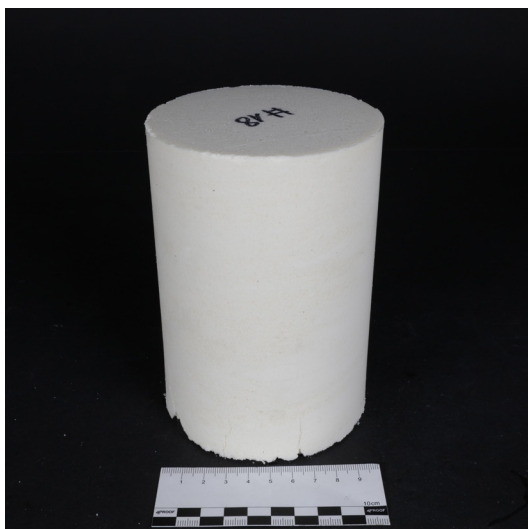
T20 D3 Hammermühle #17.4



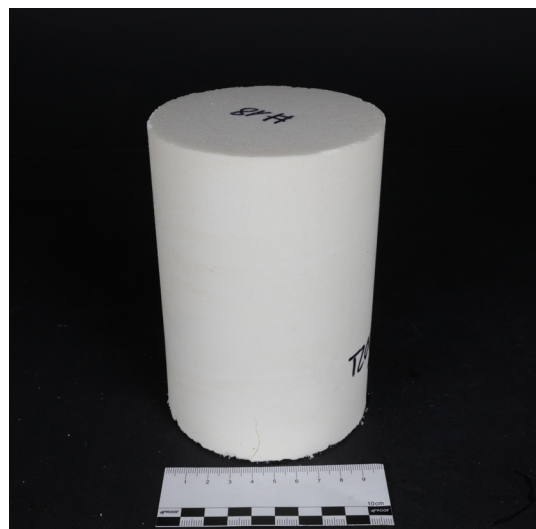
T20 D3 Hammermühle #18.1



T20 D3 Hammermühle #18.2



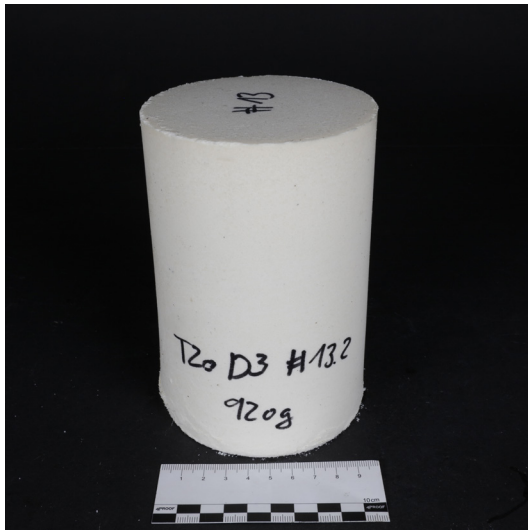
T20 D3 Hammermühle #18.3



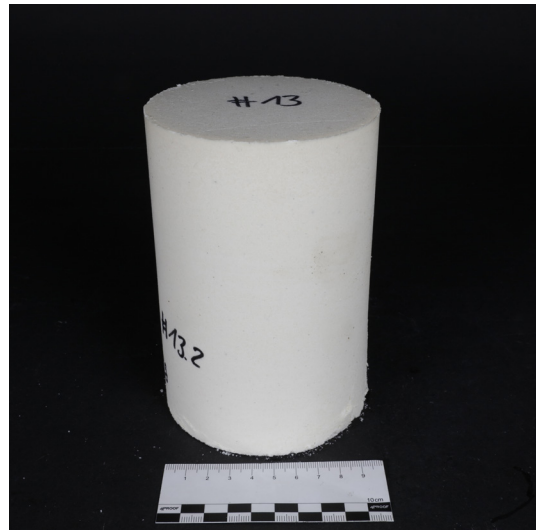
T20 D3 Hammermühle #18.4

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

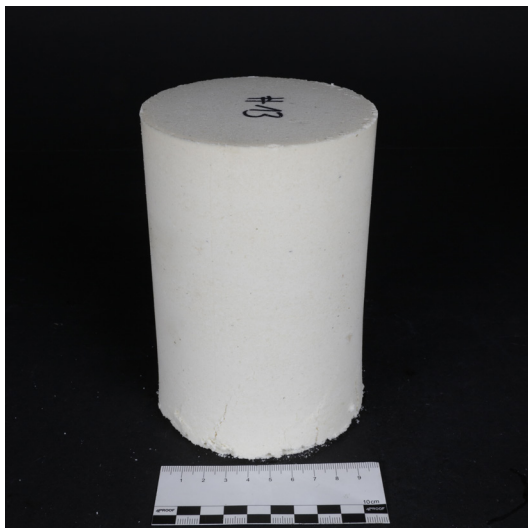
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



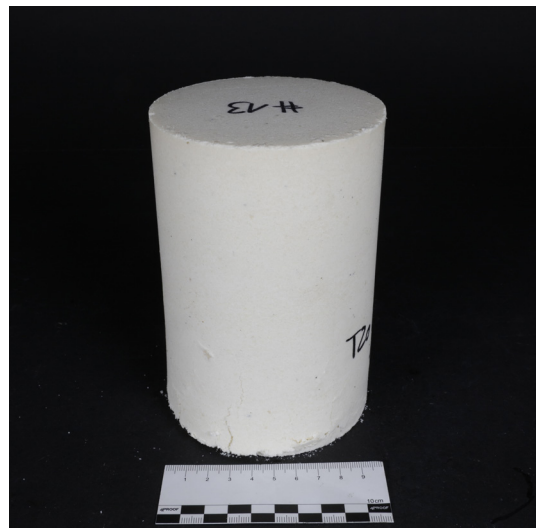
T20 D3 Prallmühle etl.4 #13.1



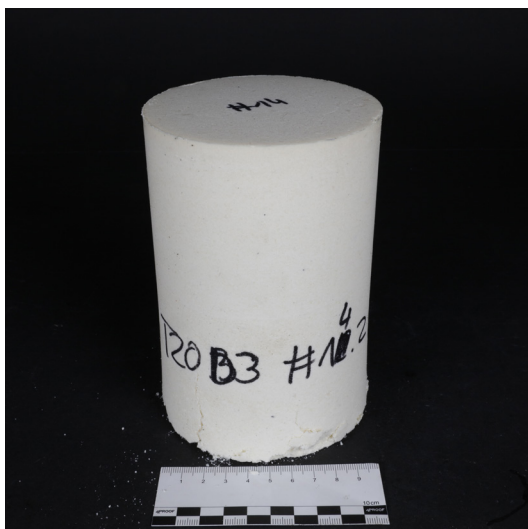
T20 D3 Prallmühle etl.4 #13.2



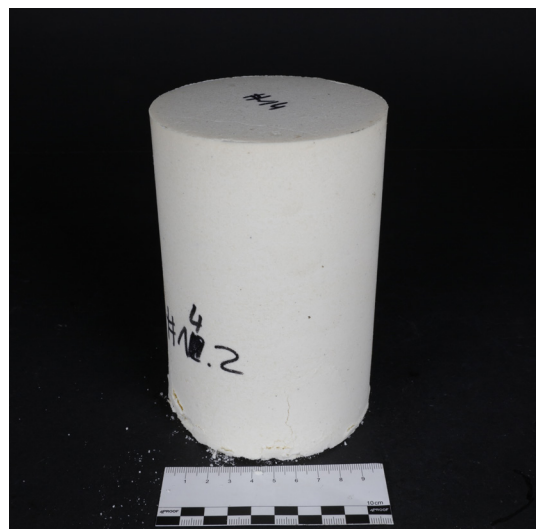
T20 D3 Prallmühle etl.4 #13.3



T20 D3 Prallmühle etl.4 #13.4



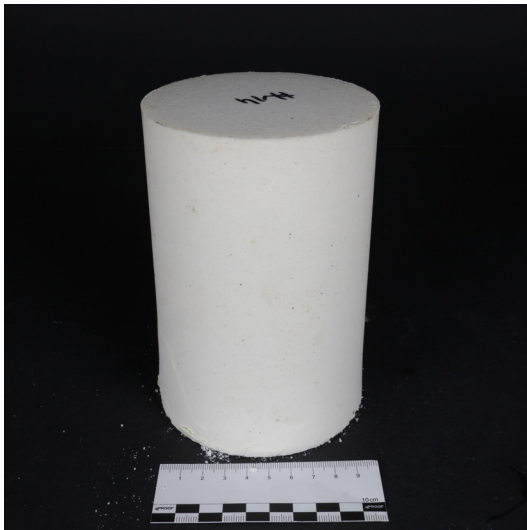
T20 D3 Prallmühle etl.5 #14.1



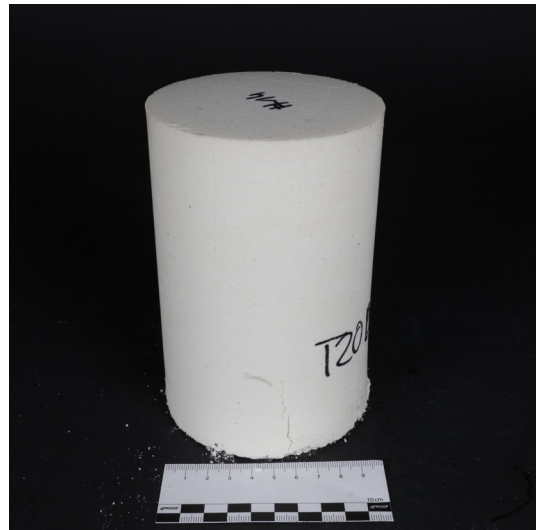
T20 D3 Prallmühle etl.5 #14.2

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

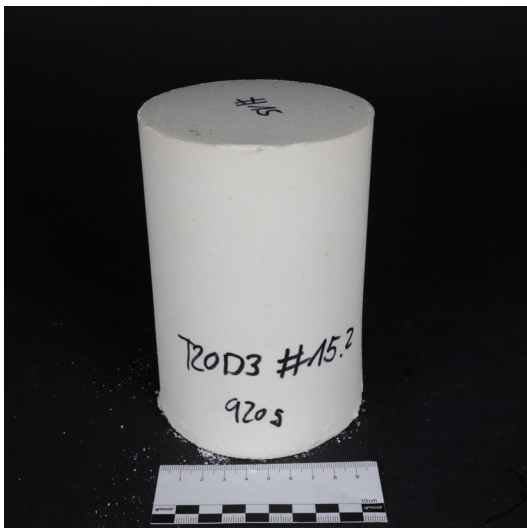
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



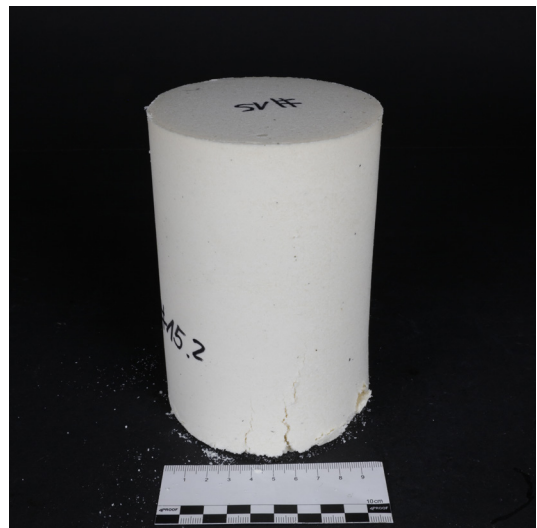
T20 D3 Prallmühle etl.5 #14.3



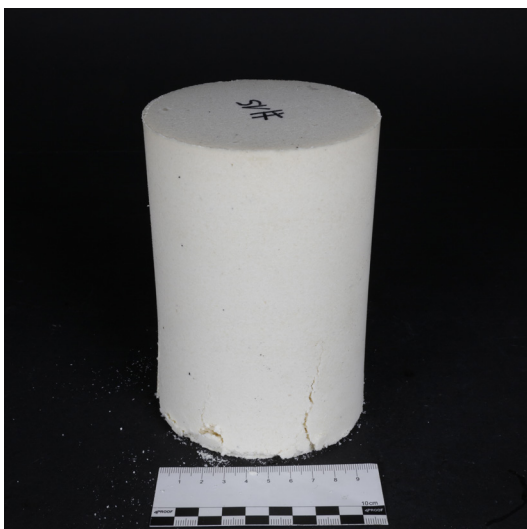
T20 D3 Prallmühle etl.5 #14.4



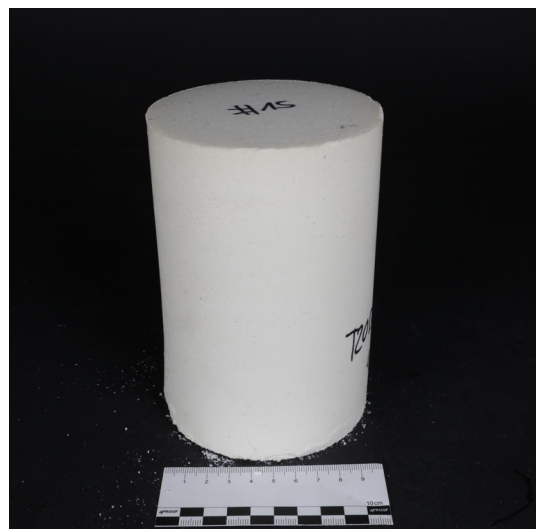
T20 D3 Prallmühle etl.6 #15.1



T20 D3 Prallmühle etl.6 #15.2



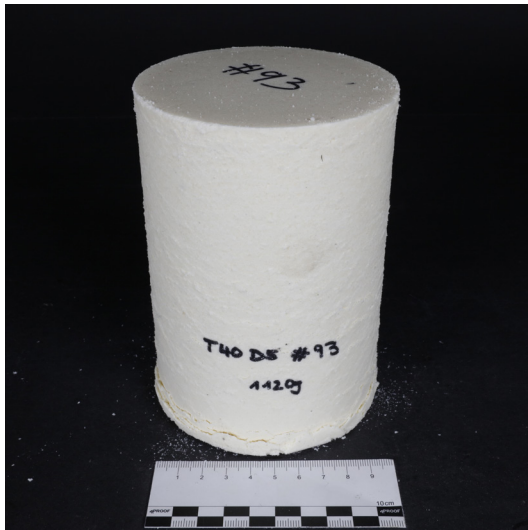
T20 D3 Prallmühle etl.6 #15.3



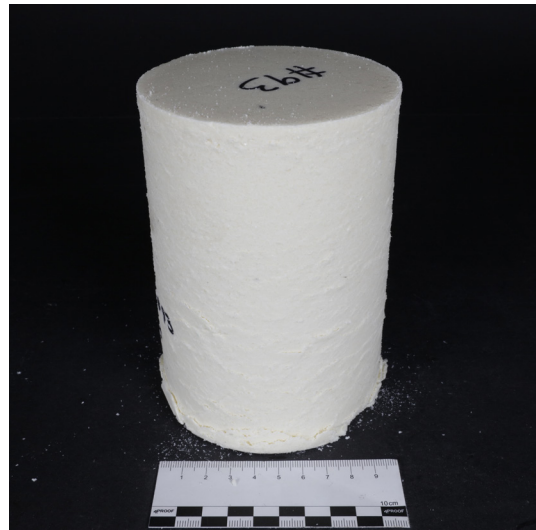
T20 D3 Prallmühle etl.6 #15.4

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



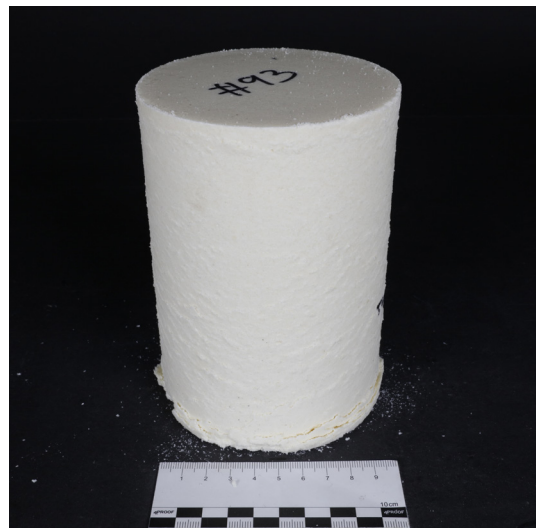
T40 D5 Großversuch #93.1



T40 D5 Großversuch #93.2



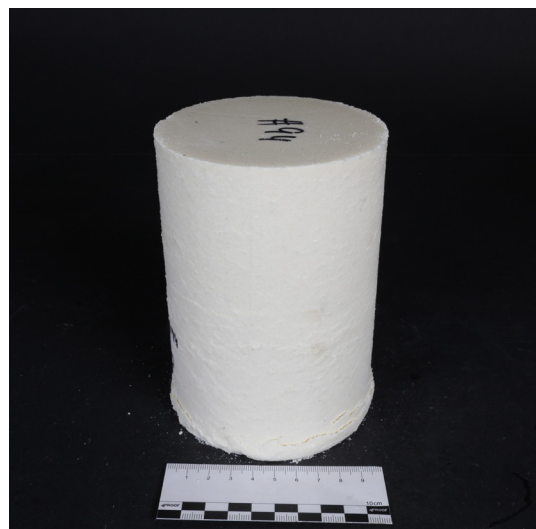
T40 D5 Großversuch #93.3



T40 D5 Großversuch #93.4



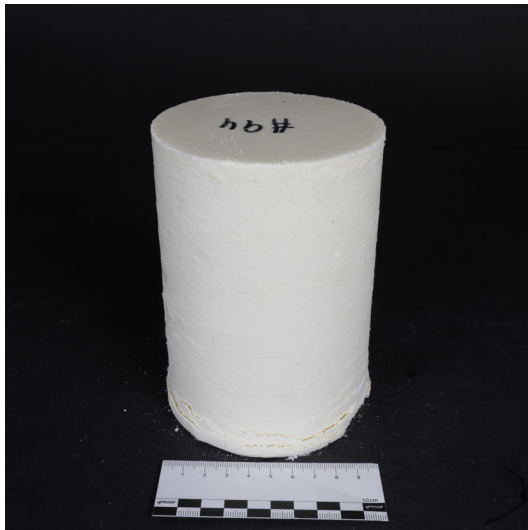
T40 D5 Großversuch #94.1



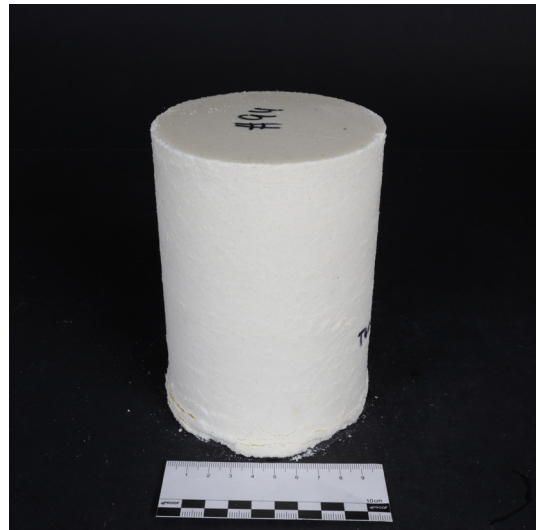
T40 D5 Großversuch #94.2

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



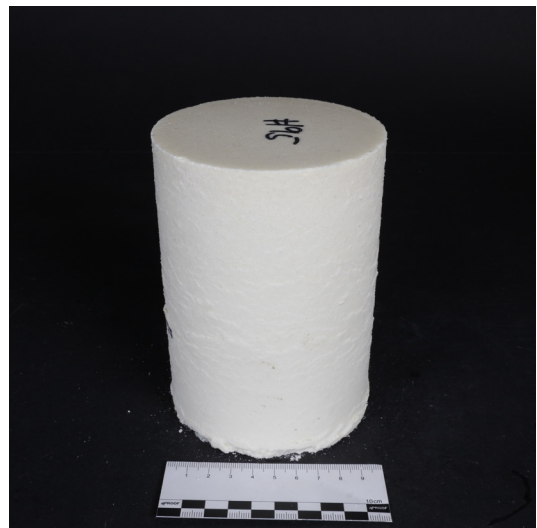
T40 D5 Großversuch #94.3



T40 D5 Großversuch #94.4



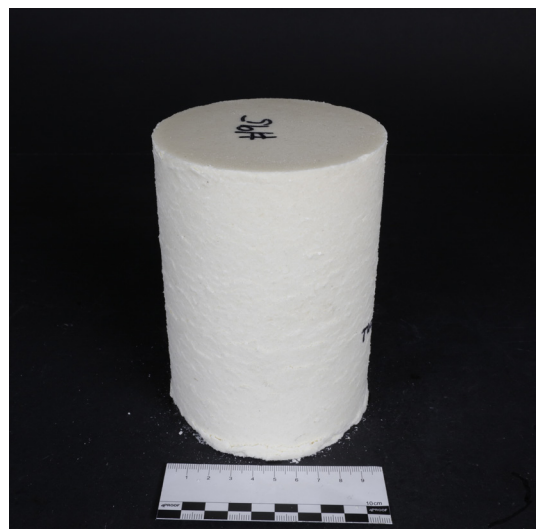
T40 D5 Großversuch #95.1



T40 D5 Großversuch #95.2



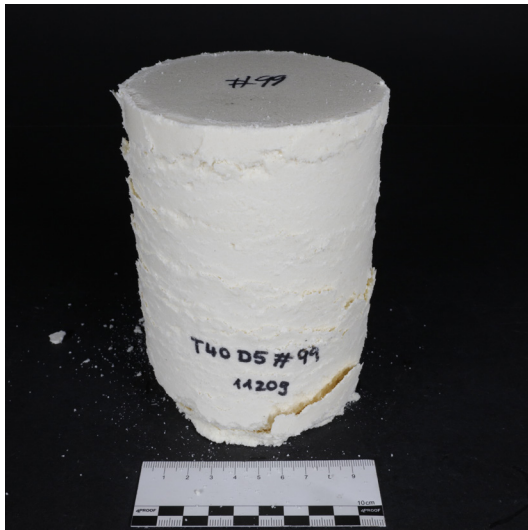
T40 D5 Großversuch #95.3



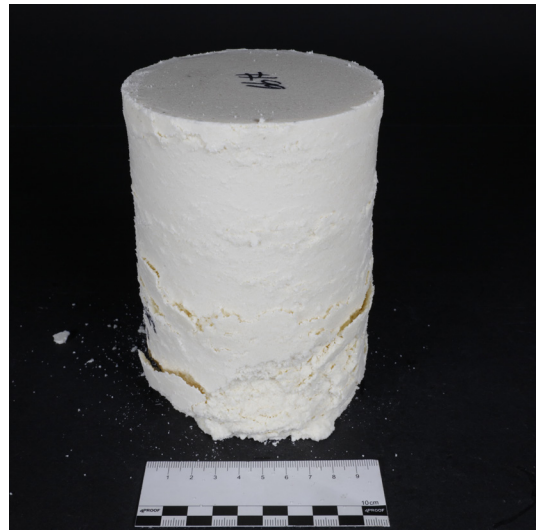
T40 D5 Großversuch #95.4

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



T40 D5 Hammermühle #99.1



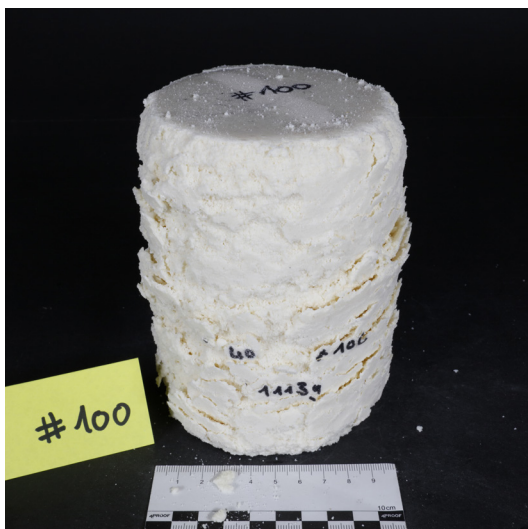
T40 D5 Hammermühle #99.2



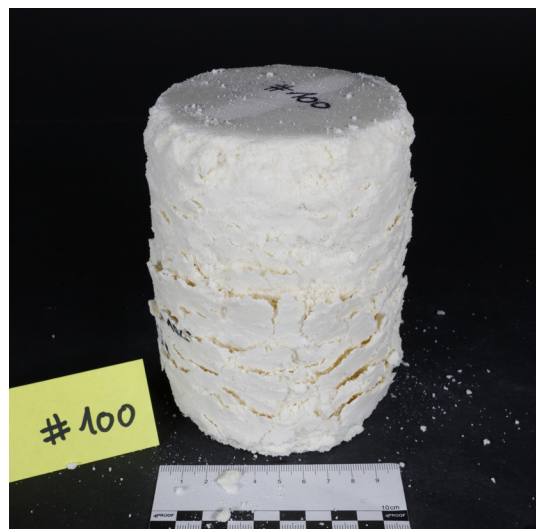
T40 D5 Hammermühle #99.3



T40 D5 Hammermühle #99.4



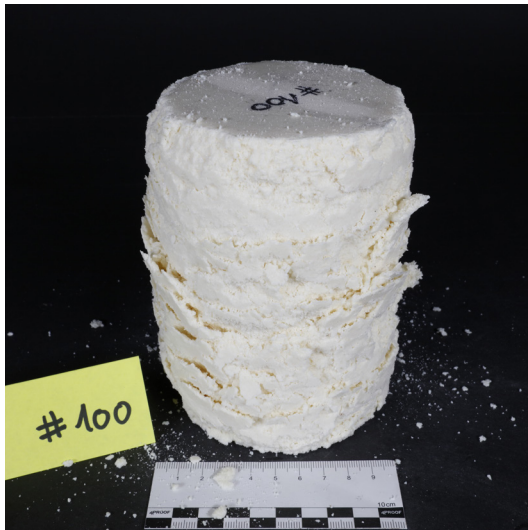
T40 D5 Hammermühle #100.1



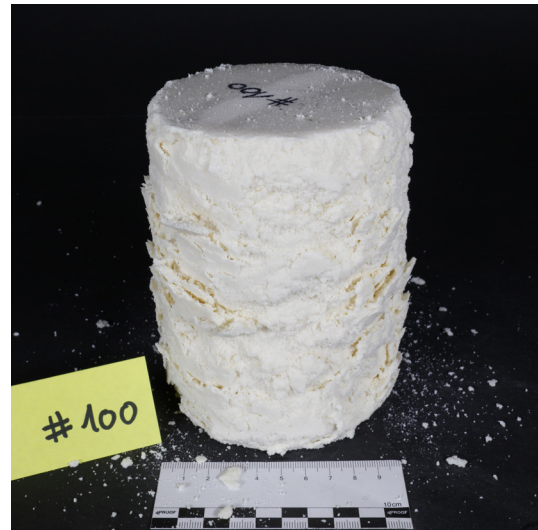
T40 D5 Hammermühle #100.2

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

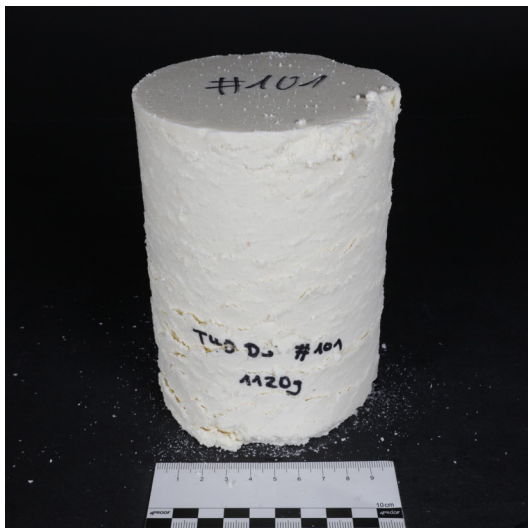
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



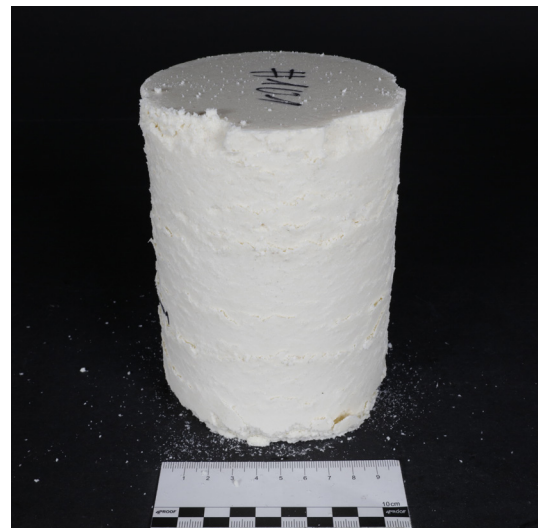
T40 D5 Hammermühle #100.3



T40 D5 Hammermühle #100.4



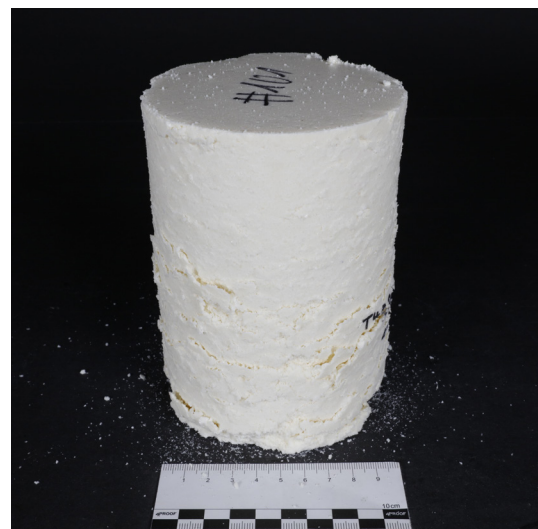
T40 D5 Hammermühle #101.1



T40 D5 Hammermühle #101.2



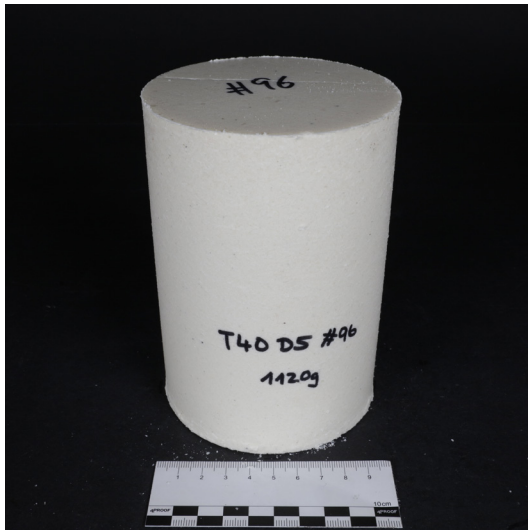
T40 D5 Hammermühle #101.3



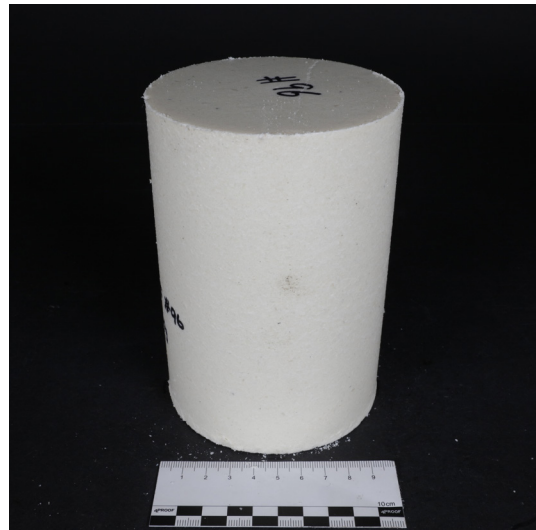
T40 D5 Hammermühle #101.4

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

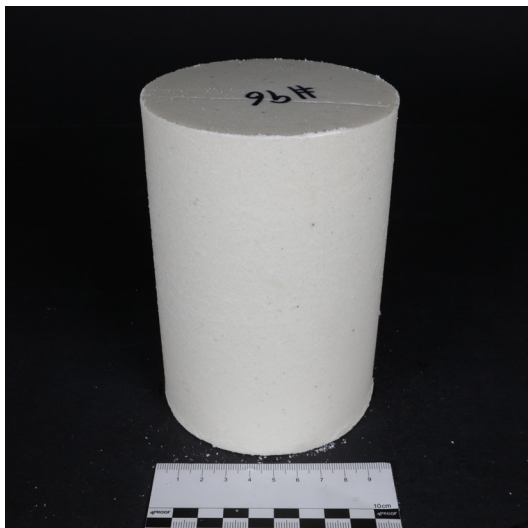
Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



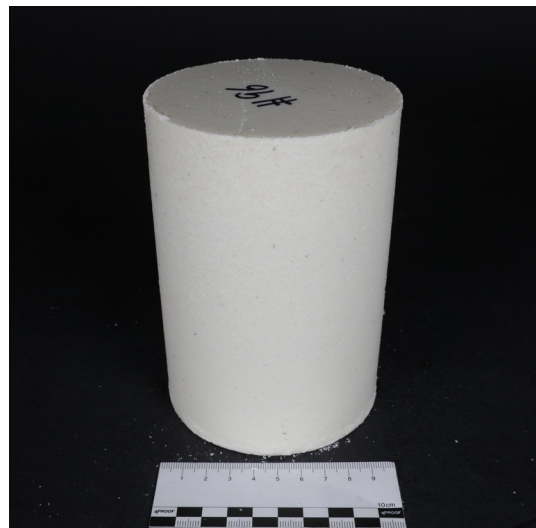
T40 D5 Prallmühle #96.1



T40 D5 Prallmühle #96.2



T40 D5 Prallmühle #96.3



T40 D5 Prallmühle #96.4



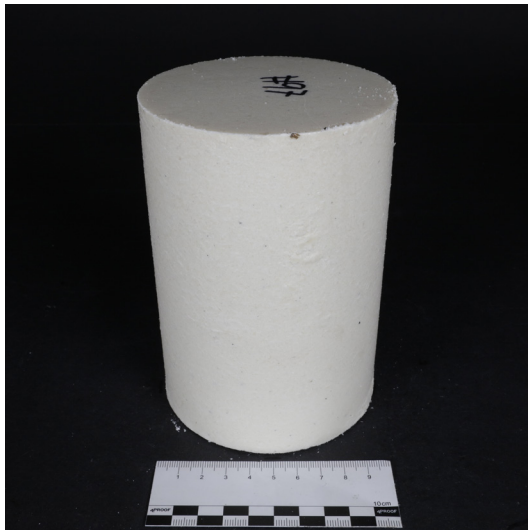
T40 D5 Prallmühle #97.1



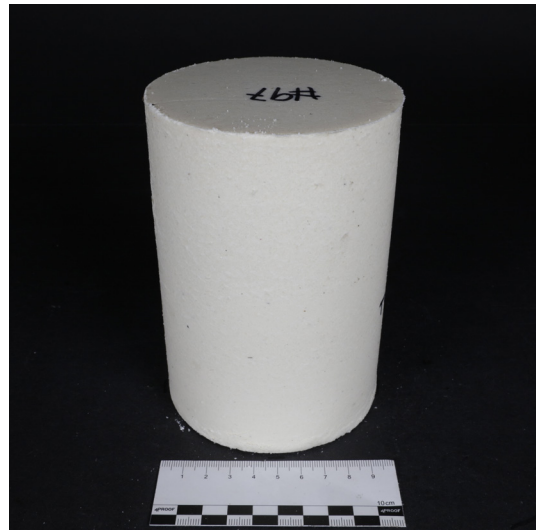
T40 D5 Prallmühle #97.2

Anhang M - Versuchsergebnisse zu Kapitel 4.6.2

Vergleich der Druckfestigkeiten von gemahlenem Wachs zu den Druckfestigkeiten aus den Versuchen
in Kap. 4 - Fotos der Prüfkörper



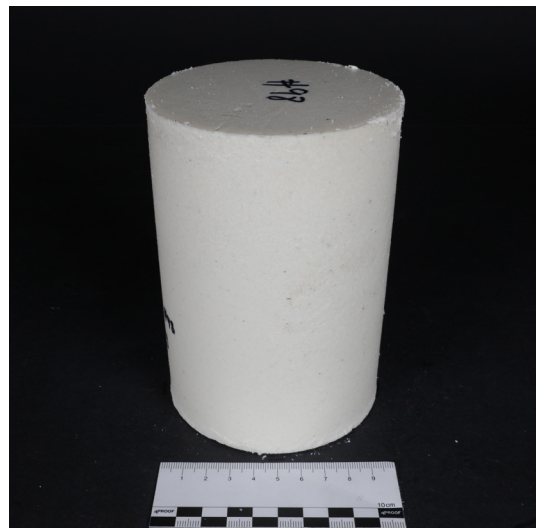
T40 D5 Prallmühle #97.3



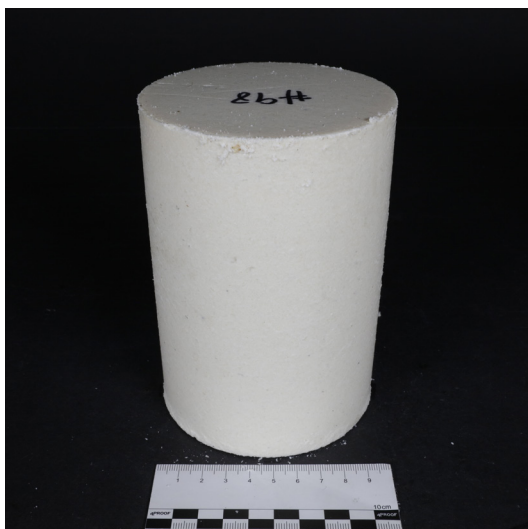
T40 D5 Prallmühle #97.4



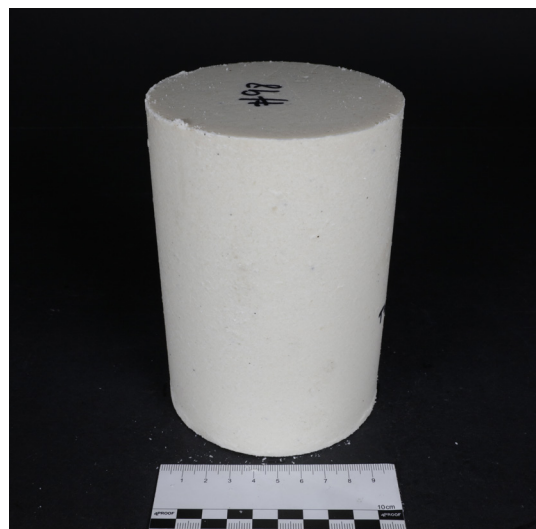
T40 D5 Prallmühle #98.1



T40 D5 Prallmühle #98.2




T40 D5 Prallmühle #98.3



T40 D5 Prallmühle #98.4

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

		Zusammenfassung Mahlversuche						Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen- und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info					
		Mahlgut:			Wachs					Tastversuch		kein Sicherheitsdatenblatt	
		anorganisch kugelig Mohs 1 0 % SiO2 k. - Ex Gefahr			ungiftig		nicht hygroskopisch						
Auftraggeber:		BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG						Forschung und Entwicklung					
Werkauftragsnummer:		W039987		Versuchsziel:			400 - 800 µm						
Protokollnummer:		17_18		Versuchsort:			JEHMLICH Technikum						
Versuchsnummer:		AG		Ziel			Sperberg						
Datum		[dd.mm.jj]		22.03.2018			22.03.2018						
Temperatur Technikum		[° C]		19,7			19,7						
Luftfeuchte Technikum		[%]		31			31						
Aufgabegut:		[-]		AG			AG						
Temperatur Schüttgut		[° C]		19,7			19,7						
Feuchte Schüttgut		[%]		0,03			0,03						
Schüttdichte		[g/cm³]		n.a.			n.a.						
Dosierung:		[-]		Hand			Schnecke						
Mühle:		[-]		HM_341			HM_341						
Mahlelement Rotor:		[-]		F20006224			F20006224						
Mahlelement Stator:		[-]		F20006281			F20006281						
Sieb:		[-]		Ja			Ja						
Siebform:		[-]		Stab			Conidur						
Siebweite		[mm]		4			2,5						
Frequenz		[Hz]		50			38						
Beanspruchungsgewindigkeit		[m/s]		76			76						
Durchsatz		[t/h]		0,5000			0,3000						
Spez. Zerkl.Energie MW		[kWh/t]		1,98			2,28						
Spez. Zerkl.Energie MAX		[kWh/t]		10,57			2,56						
Leerlaufleistung MW		[kW]		1,24			1,22						
Sm		[m²/cm³]											
x50 Produkt		[µm]											
x90 Produkt		[µm]											
Probleme		[-]											

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

Bemerkungen:

- * AG: verschiedene Zustandsformen (siehe Bilder)
- * V01 - V06: Material verursacht elektrostatische Aufladung an den Mühlen
- * V01 - V02: Vermahlung ohne Probleme; keine Ablagerungen in der Hammermühle; Absaugung vorsehen
- * V03 - V06: Feinvermahlung; stabiler Prozess ohne Kühlung mit Trockeneis; prozessierte Menge < 20 kg

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle



Zusammenfassung Versuchsergebnisse

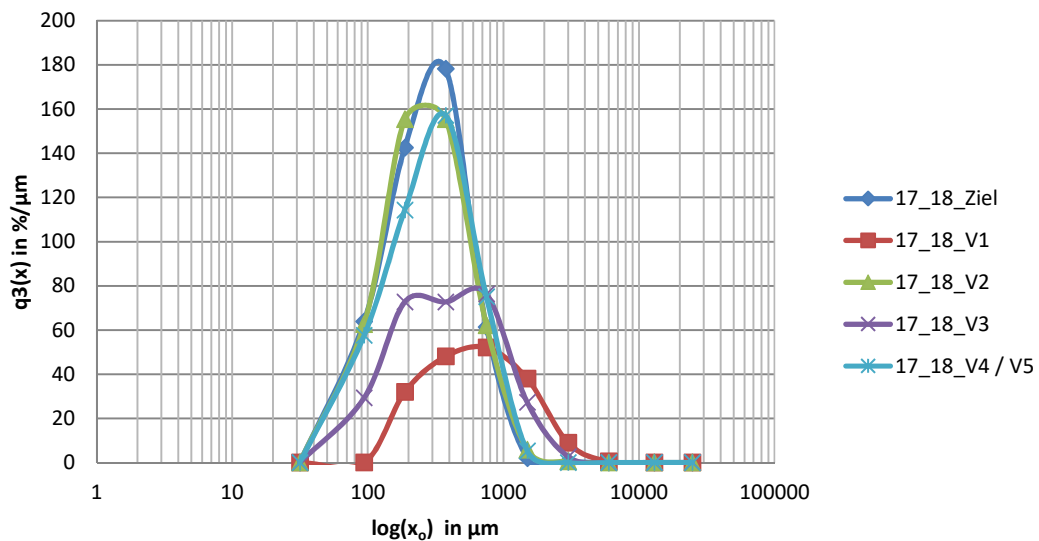
Korngrößenanalyse

Gebrüder Jehmlich GmbH
Mühlen-und Maschinenbau
Waldheimer Strasse 210
D-01683 Nossen
www.jehmlich.info

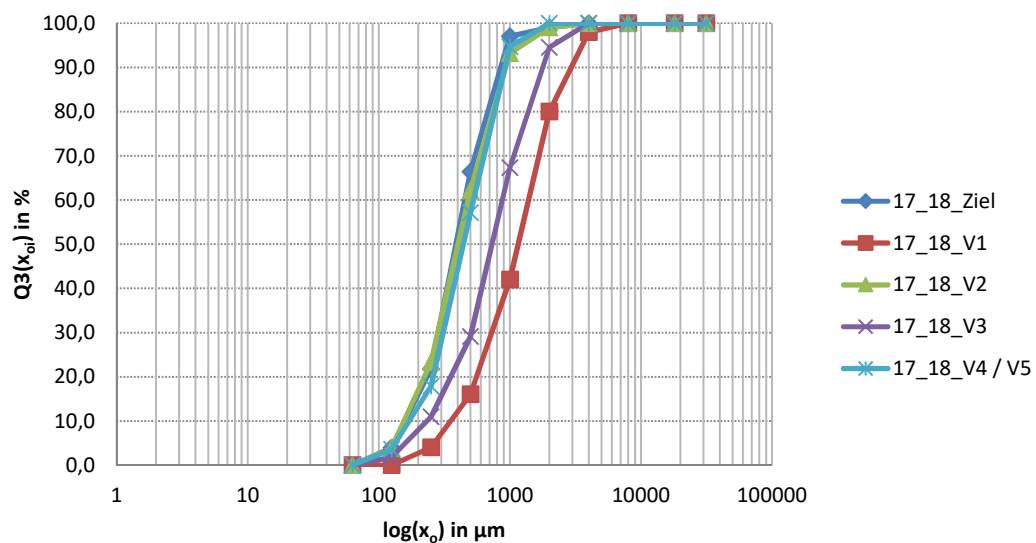
Datum: 22.03.2018

Mahlgut:	Wachs	Werkauftragsnummer:	W039987
Auftraggeber:	BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Modus Versuch:	diskontinuierlich
Versuchsziel:	400 - 800 μm	Bearbeiter:	Sperberg
Protokollnummer:	17_18	Versuchsort:	JEHLICH Technikum

Korngrößenanalyse Dichteverteilung



Korngrößenanalyse Summenverteilung




Anhang N - Mahlversuchprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	Siebanalyse Aufgabegut Fotodokumentation	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 17_18_AG	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	<h3>Siebanalyse Zielprodukt</h3> <p>Messprotokoll</p>	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
---	--	--


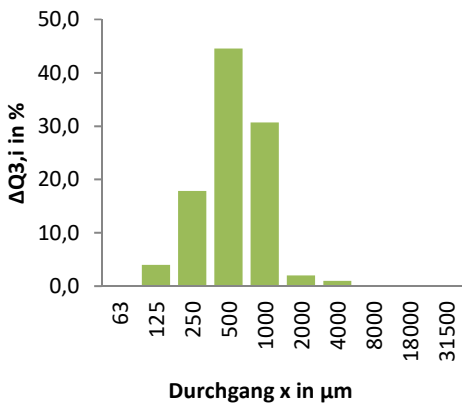
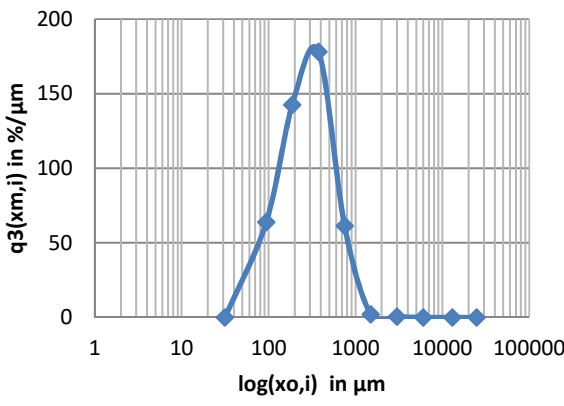
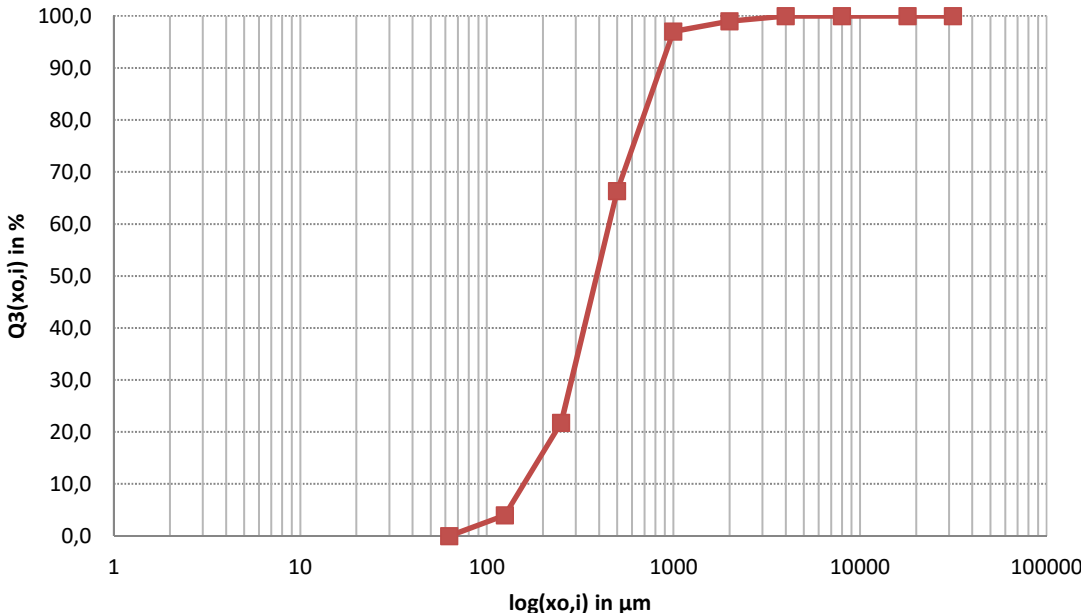
Protokollnummer: 17_18_Ziel	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Bearbeiter: Sperberg
Datum: 22.03.2018	Probebezeichnung: Wachs	
Bemerkungen:		
Mühle:	Mahlelement:	
Rotordrehzahl:	Sonstiges:	
Beanspruchungsgeschwindigkeit:		
Art des Siebgutes:	Siebsatz: R10	
Probenvorbereitung:	Probenteilung:	
Siebmethode: einzeln trocken <u>im Satz</u> nass		Siebmaschine: blau
		Einstellparameter:
Einwaage m_A: 102,5 g	Siebdauer: 3 min	Siebhilfen: Hand

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößen- klassen (Nennweite) x _{ui} bis x _{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x _{oi} [µm]	Fraktion / Rückstand *) m _i [g]		Verteilungs- summe Q ₃ (x _{oi}) [%]
				ΔQ _{3,i} / R _i *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0	0,0	100,0
5	4 - 2	4000	1	1,0	100,0
6	2 - 1	2000	2	2,0	99,0
7	1 - 0,5	1000	31	30,7	97,0
8	0,5 - 0,25	500	45	44,6	66,3
9	0,25 - 0,125	250	18	17,8	21,8
10	0,125 - 0,063	125	4	4,0	4,0
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			101		

Masseverlust: m_A-Σ(m_i)= 1,5 g entspricht 1,5 %



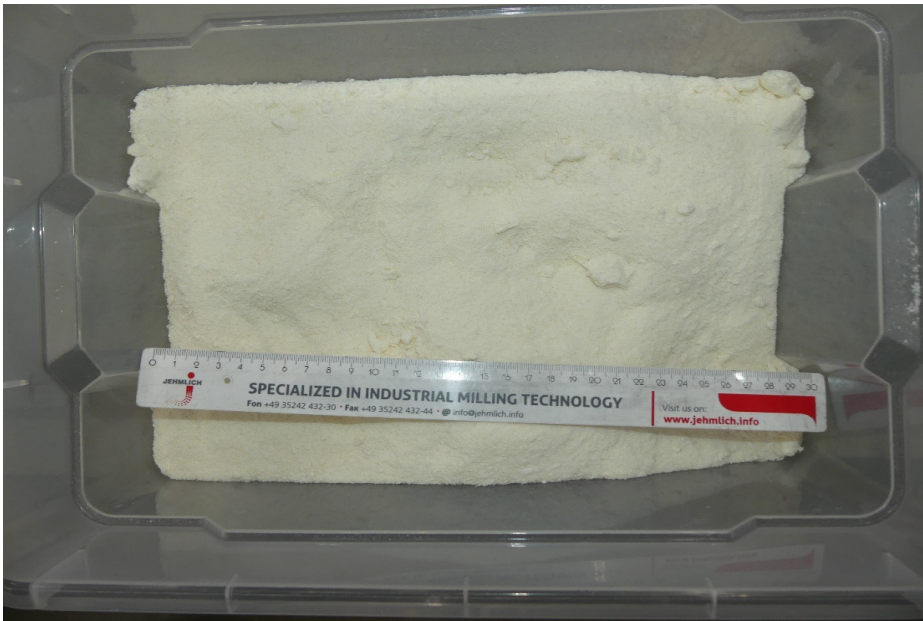
Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	<h3>Siebanalyse Zielprodukt</h3> <p>Auswertung</p>	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 17_18_Ziel	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
Medianwert x_{50} : mm m. Partikelgröße x_m : 0,49 mm Modalwert x_n : 0,23 mm		Sauter-Durchmesser x_{ST} : volumenspez. Oberfläche S_v : massespez. Oberfläche S_m :
<h4 style="text-align: center;">Histogramm Siebanalyse</h4> 		<h4 style="text-align: center;">Dichteverteilung Siebanalyse</h4> 
<h4 style="text-align: center;">Summenverteilung Siebanalyse</h4> 		


Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	Siebanalyse Zielprodukt Fotodokumentation	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 17_18_Ziel	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
		
<p>oben: Aufgabegut (Kügelchen) V3 - V5 unten: Zielprodukt</p>		
		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle


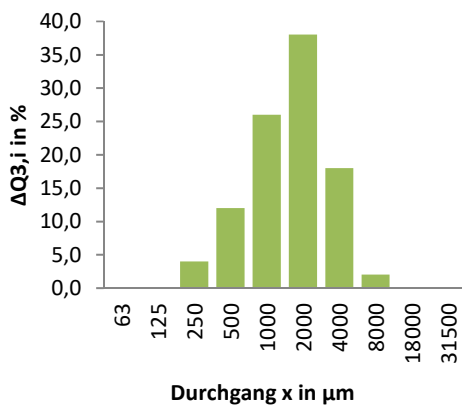
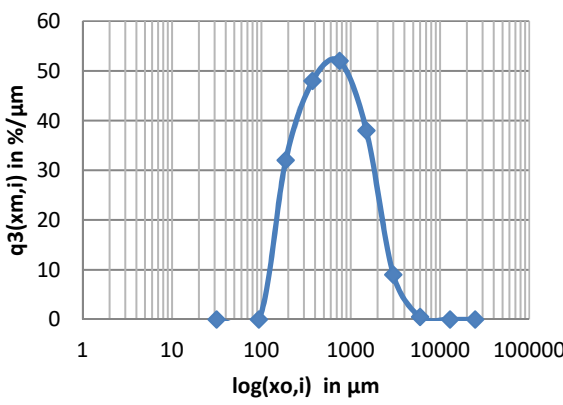
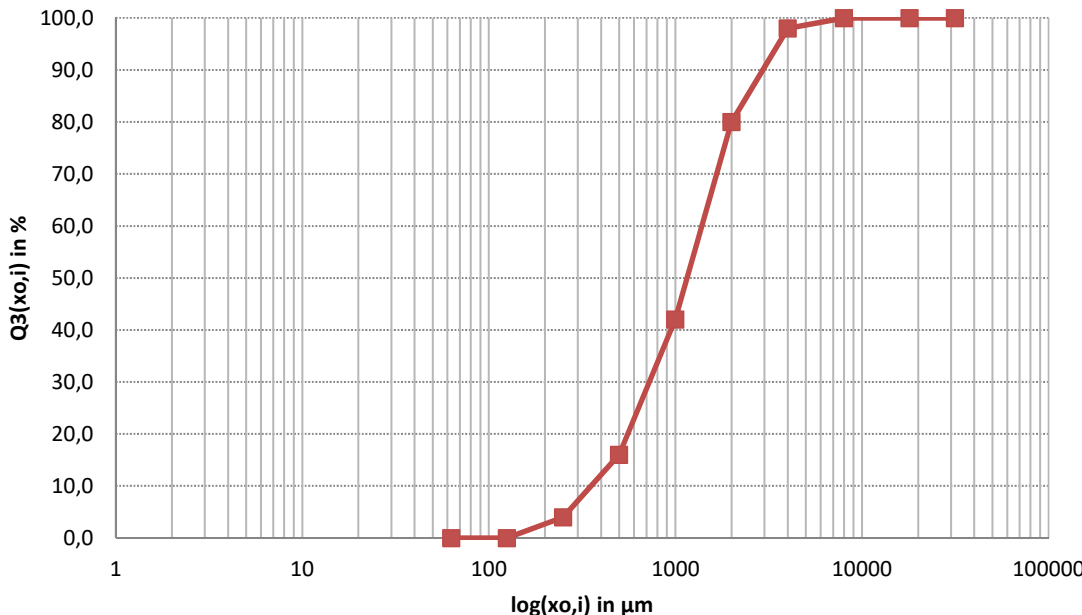
		<h3>Siebanalyse V1</h3> <p>Messprotokoll</p>		Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info	
Protokollnummer: 17_18_V1		Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG		Bearbeiter: Sperberg	
Datum: 22.03.2018		Probebezeichnung: Wachs			
		Bemerkungen:			
Mühle: HM_341		Mahlelement: 0 0			
Rotordrehzahl: 50		Sonstiges:			
Beanspruchungsgeschwindigkeit: nt_Versuchsparam					
Art des Siebgutes:		Siebsatz: R10			
Probenvorbereitung:		Probenteilung:			
Siebmethode: einzeln trocken im Satz nass		Siebmaschine: blau			
		Einstellparameter:			
Einwaage m_A: 51,5 g		Siebdauer: 3 min		Siebhilfen: Hand	

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößenklassen (Nennweite) x_{ui} bis x_{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x_{oi} [µm]	Fraktion / Rückstand *) m_i [g]		Verteilungs- summe $Q_3(x_{oi})$ [%]
				$\Delta Q_{3,i} / R_i$ *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	1	2,0	100,0
5	4 - 2	4000	9	18,0	98,0
6	2 - 1	2000	19	38,0	80,0
7	1 - 0,5	1000	13	26,0	42,0
8	0,5 - 0,25	500	6	12,0	16,0
9	0,25 - 0,125	250	2	4,0	4,0
10	0,125 - 0,063	125	0	0,0	0,0
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			50		

Masseverlust: $m_A - \Sigma(m_i) =$ 1,5 g entspricht 2,9 %


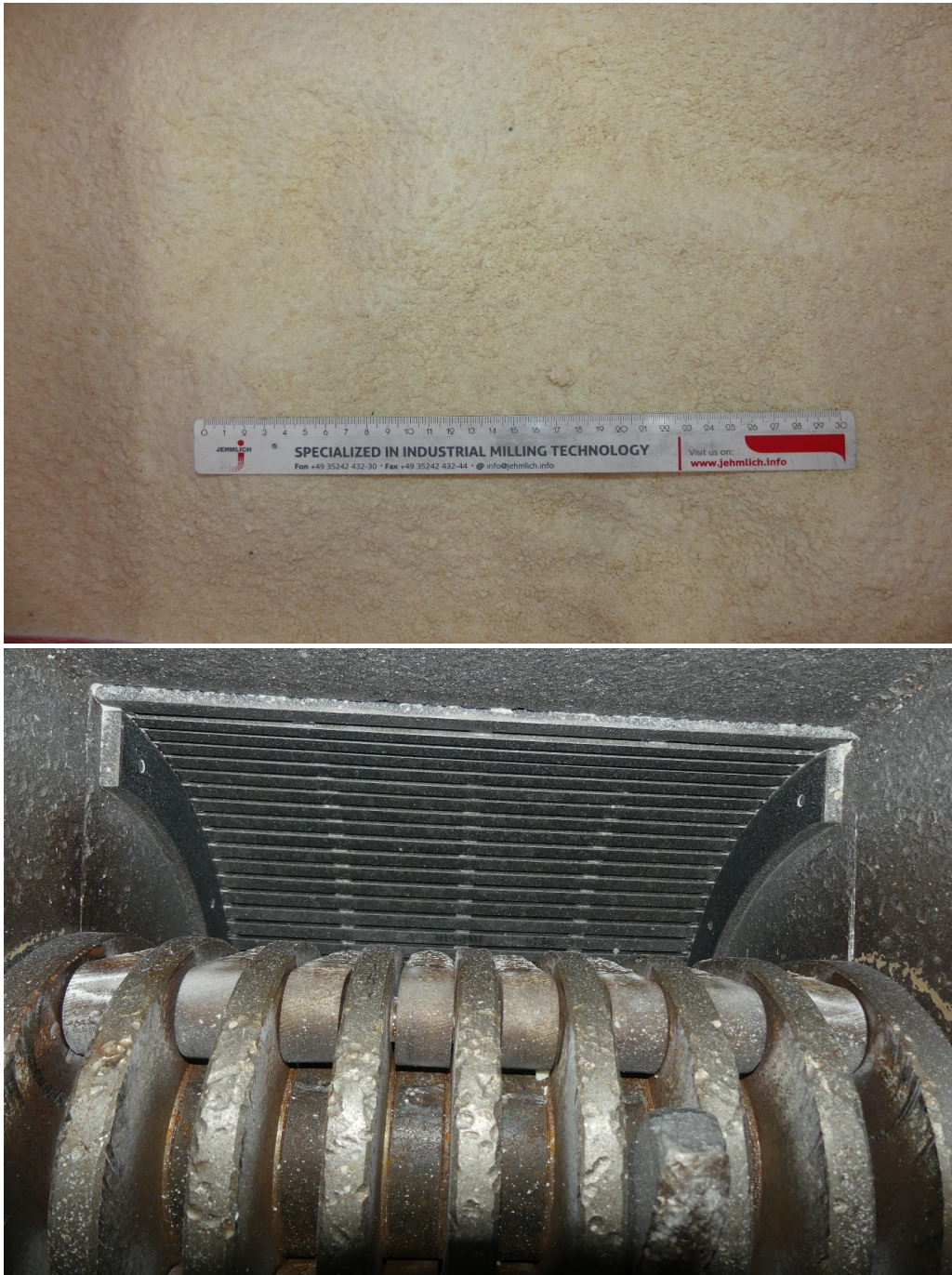
Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

<div></div>	<div>Siebanalyse V1</div> <div>Auswertung</div>	<div>Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info</div>
<div>Auftrag Nr.: 17_18_V1</div>	<div>Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG</div>	<div>Probebezeichnung: Wachs</div>
<div>Medianwert x_{50}: m. Partikelgröße x_m: Modalwert x_n: 1,20 mm 1,48 mm 0,57 mm</div>	<div>Sauter-Durchmesser x_{ST}: volumenspez. Oberfläche S_v: massespez. Oberfläche S_m:</div>	
<div><div>Histogramm Siebanalyse</div></div>	<div><div>Dichteverteilung Siebanalyse</div></div>	
<div><div>Summenverteilung Siebanalyse</div></div>		


Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	Siebanalyse V1 Fotodokumentation	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 17_18_V1	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle


		<h3>Siebanalyse V2</h3> <p>Messprotokoll</p>		Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info	
Protokollnummer: 17_18_V2		Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG		Bearbeiter: Sperberg	
Datum: 22.03.2018		Probebezeichnung: Wachs Bemerkungen:			
Mühle: HM_341		Mahlelement: 0 0			
Rotordrehzahl: 50		Sonstiges:			
Beanspruchungsgeschwindigkeit: 0					
Art des Siebgutes:		Siebsatz: R10			
Probenvorbereitung:		Probenteilung:			
Siebmethode: einzeln trocken <u>im Satz</u> nass		Siebmaschine: blau			
		Einstellparameter:			
Einwaage m_A: 54,5 g		Siebdauer: 3 min		Siebhilfen: Hand	

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößen- klassen (Nennweite) x_{ui} bis x_{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x_{oi} [µm]	Fraktion / Rückstand *) m_i [g]		Verteilungs- summe $Q_3(x_{oi})$ [%]
				$\Delta Q_{3,i} / R_i$ *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0	0,0	100,0
5	4 - 2	4000	0,5	1,0	100,0
6	2 - 1	2000	3	5,8	99,0
7	1 - 0,5	1000	16	31,1	93,2
8	0,5 - 0,25	500	20	38,8	62,1
9	0,25 - 0,125	250	10	19,4	23,3
10	0,125 - 0,063	125	2	3,9	3,9
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			51,5		

Masseverlust: $m_A - \Sigma(m_i) =$ 3 g entspricht 5,5 %


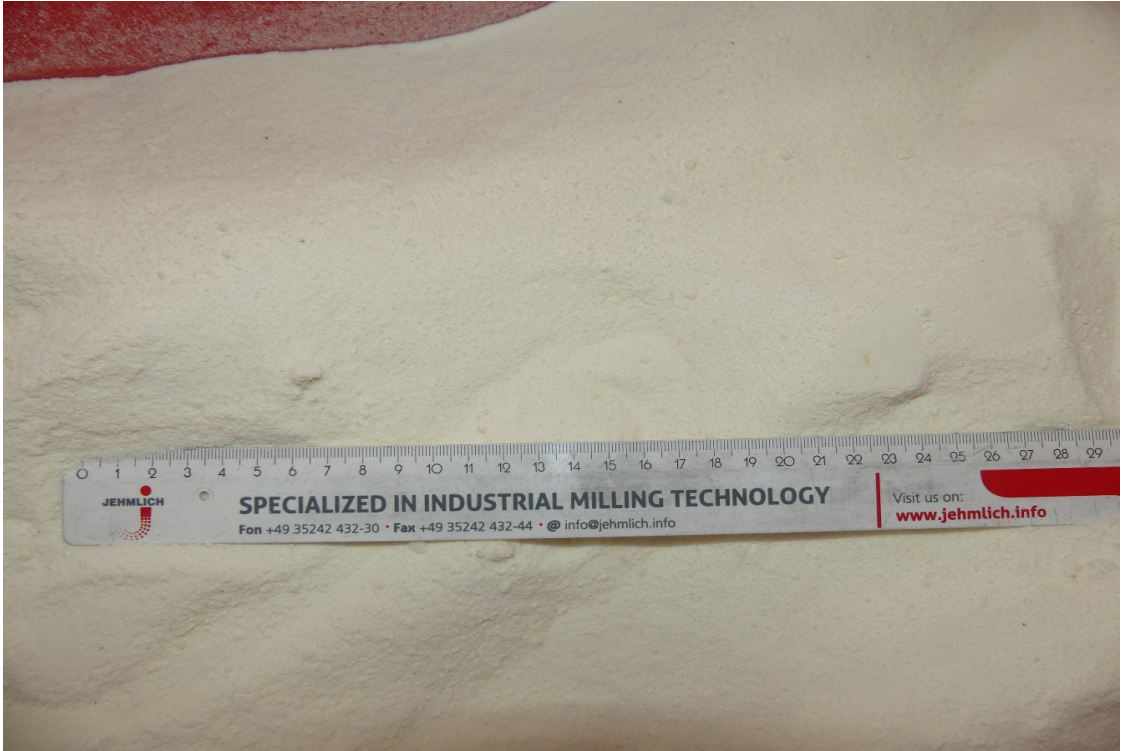
Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

<div></div>	<div>Siebanalyse V2</div> <div>Auswertung</div>	<div>Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info</div>
<div>Auftrag Nr.: 17_18_V2</div>	<div>Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG</div>	<div>Probebezeichnung: Wachs</div>
<div>Medianwert x_{50}: m. Partikelgröße x_m: Modalwert x_n: 0,40 mm 0,53 mm 0,23 mm</div>	<div>Sauter-Durchmesser x_{ST}: volumenspez. Oberfläche S_v: massespez. Oberfläche S_m:</div>	
<div><div>Histogramm Siebanalyse</div></div>	<div><div>Dichteverteilung Siebanalyse</div></div>	
<div><div>Summenverteilung Siebanalyse</div></div>		


Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	Siebanalyse V2 Fotodokumentation	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 17_18_V2	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
		
<p>oben: Produkt V2</p>		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	<h3>Siebanalyse V3</h3> <p>Messprotokoll</p>	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
---	---	--


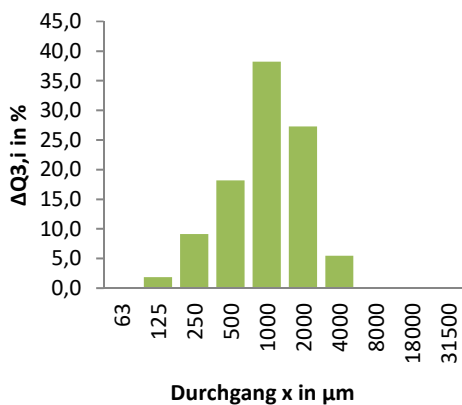
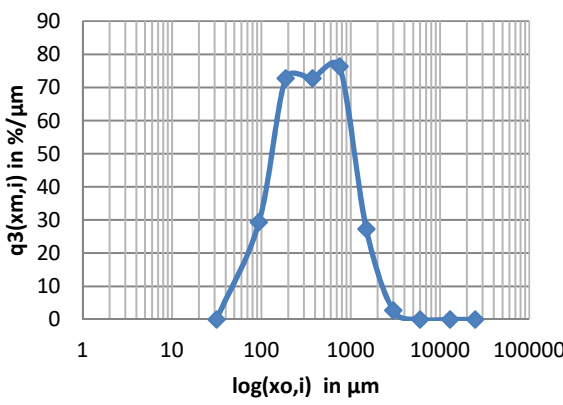
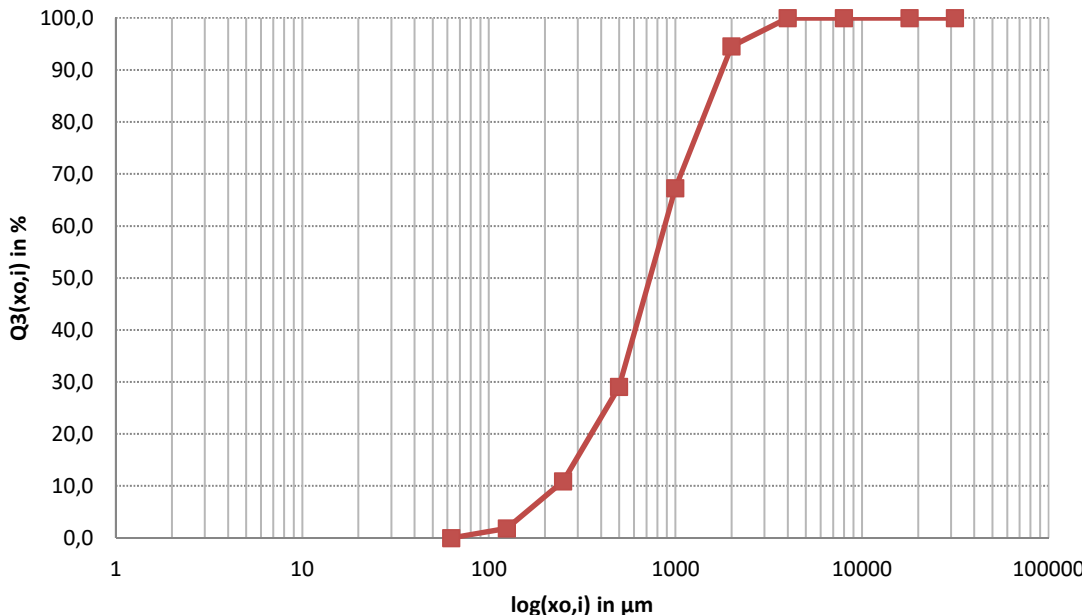
Protokollnummer: 17_18_V3	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Bearbeiter: Sperberg
Datum: 22.03.2018	Probebezeichnung: Wachs	
Bemerkungen:		
Mühle: Rekord_224	Mahlelement: F20006224 F20006281	
Rotordrehzahl: 38	Sonstiges:	
Beanspruchungsgeschwindigkeit: 76		
Art des Siebgutes:	Siebsatz: R10	
Probenvorbereitung:	Probenteilung:	
Siebmethode: einzeln trocken <u>im Satz</u> nass		Siebmaschine: blau
		Einstellparameter:
Einwaage m_A: 55,5 g	Siebdauer: 3 min	Siebhilfen: Hand

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößen- klassen (Nennweite) x _{ui} bis x _{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x _{oi} [µm]	Fraktion / Rückstand *) m _i [g]		Verteilungs- summe Q ₃ (x _{oi}) [%]
				ΔQ _{3,i} / R _i *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0	0,0	100,0
5	4 - 2	4000	3	5,5	100,0
6	2 - 1	2000	15	27,3	94,5
7	1 - 0,5	1000	21	38,2	67,3
8	0,5 - 0,25	500	10	18,2	29,1
9	0,25 - 0,125	250	5	9,1	10,9
10	0,125 - 0,063	125	1	1,8	1,8
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			55		

Masseverlust: m_A-Σ(m_i)= 0,5 g entspricht 0,9 %

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

<div></div>	<div>Siebanalyse V3</div> <div>Auswertung</div>	<div>Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info</div>
<div>Auftrag Nr.: 17_18_V3</div>	<div>Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG</div>	<div>Probebezeichnung: Wachs</div>
<div>Medianwert x_{50}: m. Partikelgröße x_m: Modalwert x_n: 0,70 mm 0,94 mm 0,41 mm</div>	<div>Sauter-Durchmesser x_{ST}: volumenspez. Oberfläche S_v: massespez. Oberfläche S_m:</div>	
<div><div>Histogramm Siebanalyse</div></div>	<div><div>Dichteverteilung Siebanalyse</div></div>	
<div><div>Summenverteilung Siebanalyse</div></div>		


Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	<h1>Siebanalyse V3</h1> <p>Fotodokumentation</p>	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 17_18_V3	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
		


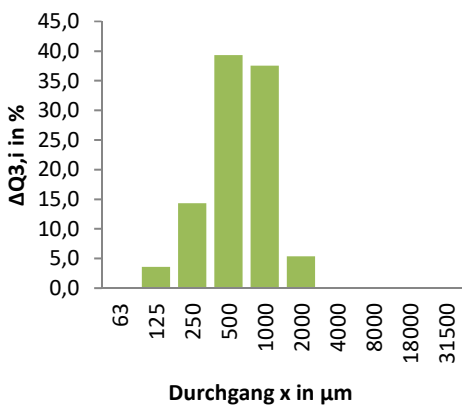
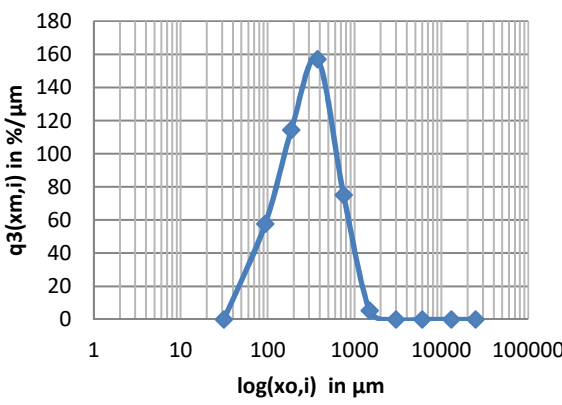
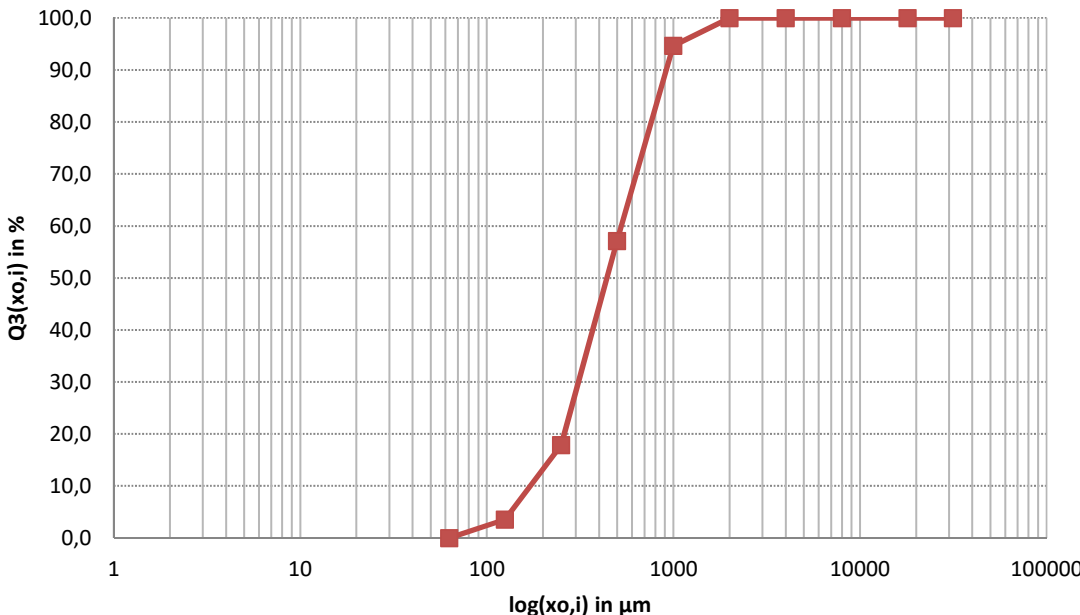
Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

		Siebanalyse V4 / V5 Messprotokoll		Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info	
Protokollnummer: 17_18_V4 / V5		Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG		Bearbeiter: Sperberg	
Datum: 22.03.2018		Probebezeichnung: Wachs Bemerkungen:			
Mühle: Rekord_224		Mahlelement: F20006224 F20006281			
Rotordrehzahl: 38		Sonstiges:			
Beanspruchungsgeschwindigkeit: 76					
Art des Siebgutes:		Siebsatz: R10			
Probenvorbereitung:		Probenteilung:			
Siebmethode: einzeln trocken <u>im Satz</u> nass		Siebmaschine: blau			
		Einstellparameter:			
Einwaage m_A: 57,5 g		Siebdauer: 3 min		Siebhilfen: Hand	
1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößenklassen (Nennweite) x_{ui} bis x_{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x_{oi} [µm]	Fraktion / Rückstand *) m_i [g]		Verteilungs- summe $Q_3(x_{oi})$ [%]
				$\Delta Q_{3,i} / R_i$ *)	
				[%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0	0,0	100,0
5	4 - 2	4000	0	0,0	100,0
6	2 - 1	2000	3	5,4	100,0
7	1 - 0,5	1000	21	37,5	94,6
8	0,5 - 0,25	500	22	39,3	57,1
9	0,25 - 0,125	250	8	14,3	17,9
10	0,125 - 0,063	125	2	3,6	3,6
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			56		
Masseverlust: $m_A - \Sigma(m_i) =$ 1,5 g entspricht 2,6 %					


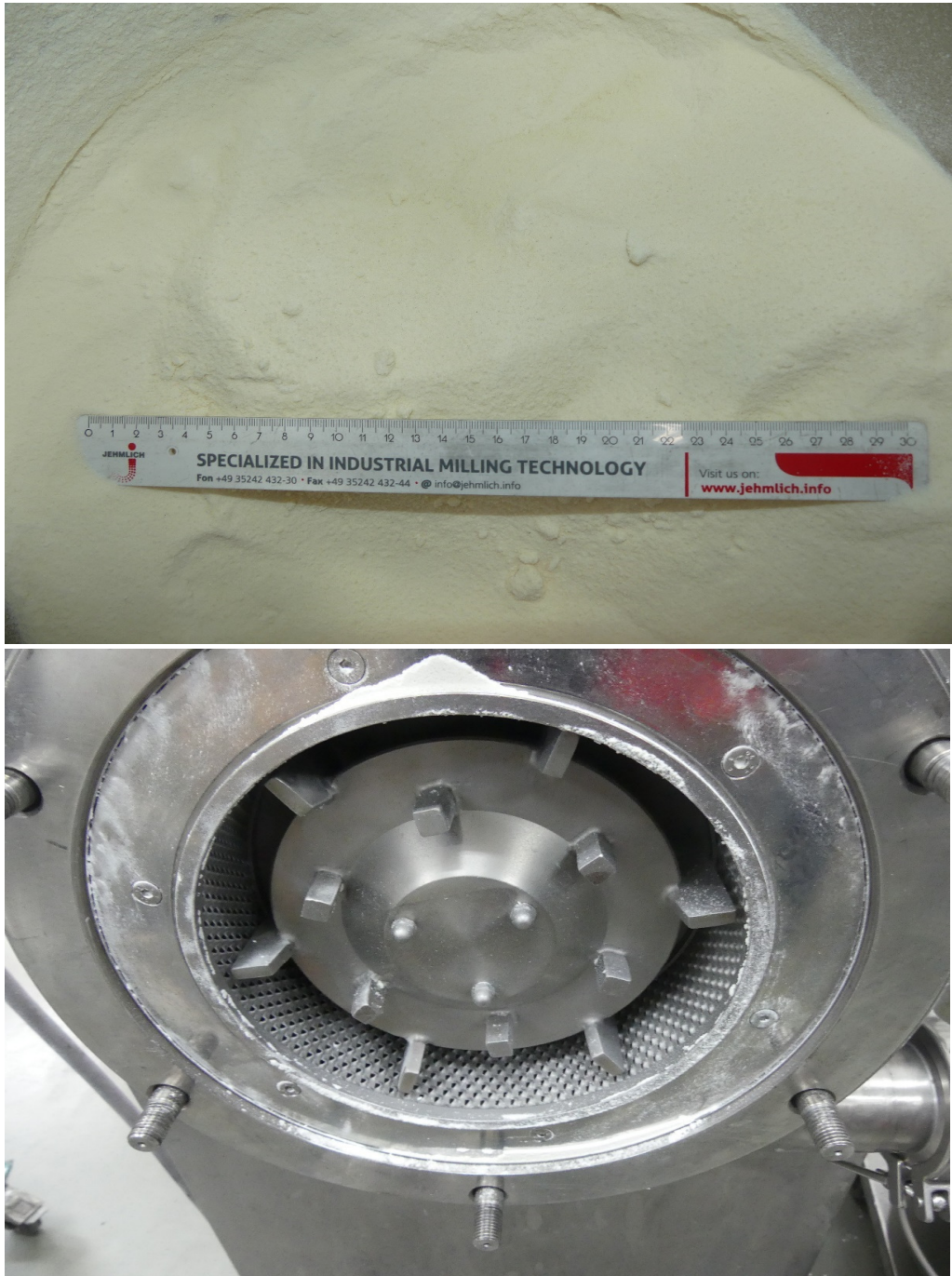
Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

<div></div>	<div>Siebanalyse V4 / V5</div> <div>Auswertung</div>	<div>Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info</div>
<div>Auftrag Nr.: 17_18_V4 / V5</div>	<div>Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG</div>	<div>Probebezeichnung: Wachs</div>
<div>Medianwert x_{50}: m. Partikelgröße x_m: Modalwert x_n: 0,45 mm 0,54 mm 0,28 mm</div>	<div>Sauter-Durchmesser x_{ST}: volumenspez. Oberfläche S_v: massespez. Oberfläche S_m:</div>	
<div><div>Histogramm Siebanalyse</div></div>	<div><div>Dichteverteilung Siebanalyse</div></div>	
<div><div>Summenverteilung Siebanalyse</div></div>		



Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	Siebanalyse V4 / V5 Fotodokumentation	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 17_18_V4 / V5	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
		


Anhang N - Mahlversuchprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	Siebanalyse V6 Fotodokumentation	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 17_18_V6	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
		
<p>oben: Produkt V6</p>		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	Zusammenfassung Mahlversuche								Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen- und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info		
	Mahlgut: Wachs					Tastversuch		Sicherheitsdatenblatt vorhanden			
	organisch	kugelig	Mohs 1	0 % SiO ₂	k. - Ex Gefahr	ungiftig	nicht hygroskopisch				
	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG					Forschung und Entwicklung					
Werkauftragsnummer: W041703		Versuchsziel: Masterbatch; wie 17_18				Modus Versuch: diskontinuierlich					
Protokollnummer: 77_18		Versuchsort: JEHMLICH Technikum				Bearbeiter: Sperberg					
Versuchsnummer:		AG	Ziel	V01	V02	V03	V04	V05	V06	V07	
Datum	[dd.mm.jj]	06.09.2018		06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018	
Temperatur Technikum	[° C]	20,6		20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	
Luftfeuchte Technikum	[%]	61		61	61	61	61	61	61	61	
Aufgabegut:	[-]	AG		BB 1	V01	BB 7	BB 4	Pastillen	Pastillen		
Temperatur Schüttgut	[° C]	20,6		20,6	20,6	20,6	20,6	24,5	24,5		
Feuchte Schüttgut	[%]	0,03		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
Schüttdichte	[g/cm ³]	n.a.		0,383	0,383	0,383	0,383	0,383	0,383		
Dosierung:	[-]			Förderband	Schnecke	Förderband	Förderband	Schnecke	Förderband		
Mühle:	[-]			HM_341	Rekord_224	HM_341	HM_341	Rekord_224	HM_341		
Mahlelement Rotor:	[-]				F20006224			F20006224			
Mahlelement Stator:	[-]				F20006281			F20006281			
Sieb:	[-]			Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
Siebform:	[-]			Stab	Conidur	Stab	Stab	Conidur	Stab		
Siebweite	[mm]			4	2,5	4	4	2,5	4		
Frequenz	[Hz]			50	38	50	50	38	50		
Beanspruchungsgewindigkeit	[m/s]				76			76			
Durchsatz	[t/h]			0,3000	0,3000	0,3000	0,3000	0,3000	0,3000		
Spez. Zerkl.Energie MW	[kWh/t]			5,00	6,00	8,90	1,69	5,58	4,80		
Spez. Zerkl.Energie MAX	[kWh/t]			22,65	0,32	14,08	2,46	6,74	8,04		
Leerlaufleistung MW	[kW]			1,17	2,25	1,11	1,09	2,07	1,26		
Abfüllung	[m ² /cm ³]			BB 1 / BB 3	BB 1 / BB 3	BB 7	BB 4	BB 8	Sack		
x50 Produkt	[µm]										
x90 Produkt	[µm]										
Probleme	[-]										

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

Bemerkungen:

- * V01: Material aus BB 1 (gebrochenes Material; einzelne Bruchstücke bis 30 cm Breite) --> Abfüllung in BB 1 und BB 3
--> Schwungscheibe empfehlenswert; eventuell HM 671 vorsehen
- * V02: kontinuierlicher Betrieb HM341 - Rekord 224 nicht möglich; durch Klumpen Überschüttung der Feinmühle und Aufschmelzen des Produktes am Sieb; separater Betrieb führt ebenfalls zum Aufschmelzen am Sieb der REKORD 224
- * V03: Material aus BB 7 (Presslinge zylinderförmig Durchmesser 10 cm; Länge bis 25 cm sowie Presslinge würfelförmig; Kantenlänge 10 cm)
--> Schwungscheibe vorsehen
- * V04: Material aus BB 4 (Feingut mit lockeren Agglomeraten); Zerkleinerung ohne Probleme
- * V05: Feinvermahlung der Pastillen; Verarbeitung von 30 kg; danach Sieb durch aufgeschmolzenes Material zugesetzt
- * V06: Vermahlung der Pastillen mit der Hammermühle; gröber als recyceltes Material

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle



Zusammenfassung Versuchsergebnisse

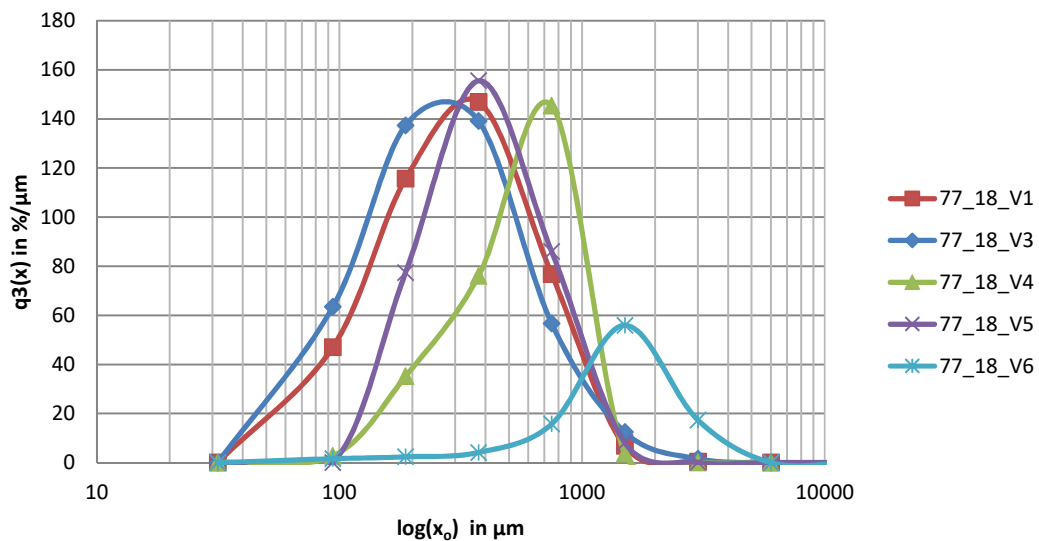
Korngrößenanalyse

Gebrüder Jehmlich GmbH
Mühlen-und Maschinenbau
Waldheimer Strasse 210
D-01683 Nossen
www.jehmlich.info

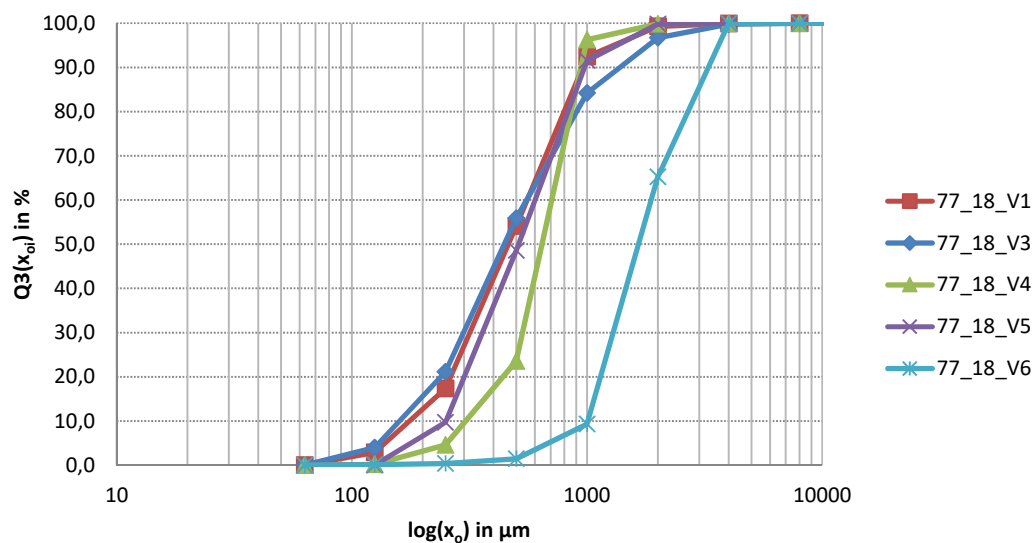
Datum: 10.09.2018

Mahlgut: Wachs	Werkauftragsnummer: W041703
Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Modus Versuch: diskontinuierlich
Versuchsziel: Masterbatch; wie 17_18	Bearbeiter: Sperberg
Protokollnummer: 77_18	Versuchsort: JEHLICH Technikum

Korngrößenanalyse Dichteverteilung




Korngrößenanalyse Summenverteilung




Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	Zusammenfassung Siebanalyse								Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen- und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info		
	Mahlgut: Wachs					Tastversuch		Sicherheitsdatenblatt vorhanden			
	organisch	kugelig	Mohs 1	0 % SiO ₂	k. - Ex Gefahr	ungiftig	nicht hygroskopisch				
	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG					Forschung und Entwicklung					
Werkauftragsnummer: W041703		Versuchsziel: Masterbatch; wie 17_18				Modus Versuch: diskontinuierlich					
Protokollnummer: 77_18		Versuchsort: JEHMLICH Technikum				Bearbeiter: Sperberg					
Versuchsnummer:		AG	Ziel	V01	V02	V03	V04	V05	V06	V07	
Datum	[dd.mm.jj]	06.09.2018		06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018	06.09.2018		
Temperatur Technikum	[° C]	20,6		20,6	20,6		20,6	20,6	20,6		
Luftfeuchte Technikum	[%]	61		61	61	61	61	61	61		
Aufgabegut:	[-]	AG		BB 1	V01	BB 7	BB 4	Pastillen	Pastillen		
Temperatur Schüttgut	[° C]	20,6		20,6	20,6	20,6	20,6	24,5	24,5		
Feuchte Schüttgut	[%]	0,03		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
Schüttdichte	[g/cm ³]	n.a.		0,383	0,383	0,383	0,383	0,383	0,383		
>31,5	[g]			0,0		0,0	0,0	0,0	0,0		
31,5 - 18	[g]			0,0		0,0	0,0	0,0	0,0		
18 - 8	[g]			0,0		0,0	0,0	0,0	0,0		
8 - 4	[g]			0,1		0,2	0,0	0,0	0,0		
4 - 2	[g]			0,6		2,9	0,1	0,2	35,2		
2 - 1	[g]			6,6		11,6	3,6	8,2	56,7		
1 - 0,5	[g]			37,1		26,3	73,0	42,7	8,0		
0,5 - 0,25	[g]			35,5		32,3	19,1	38,6	1,1		
0,25 - 0,125	[g]			14,0		15,9	4,4	9,6	0,3		
0,125 - 0,063	[g]			2,8		3,7	0,2	0,0	0,1		
< 0,063	[g]			0,0		0,0	0,0	0,0	0,0		
Einwaage:	[g]			99,5		101,0	103,0	101,0	106,0		
Bemerkungen:	[-]										

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle


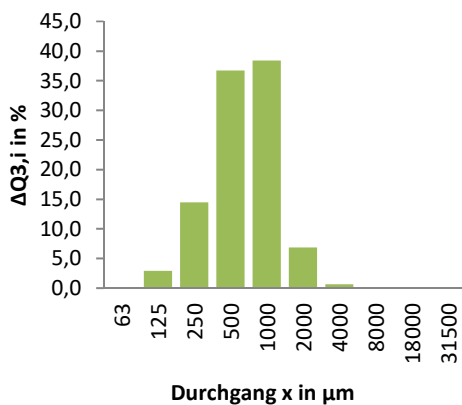
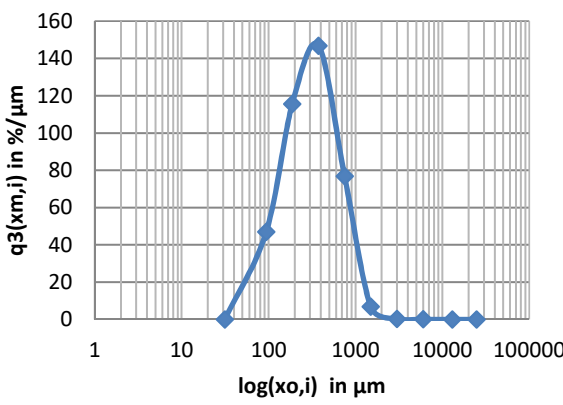
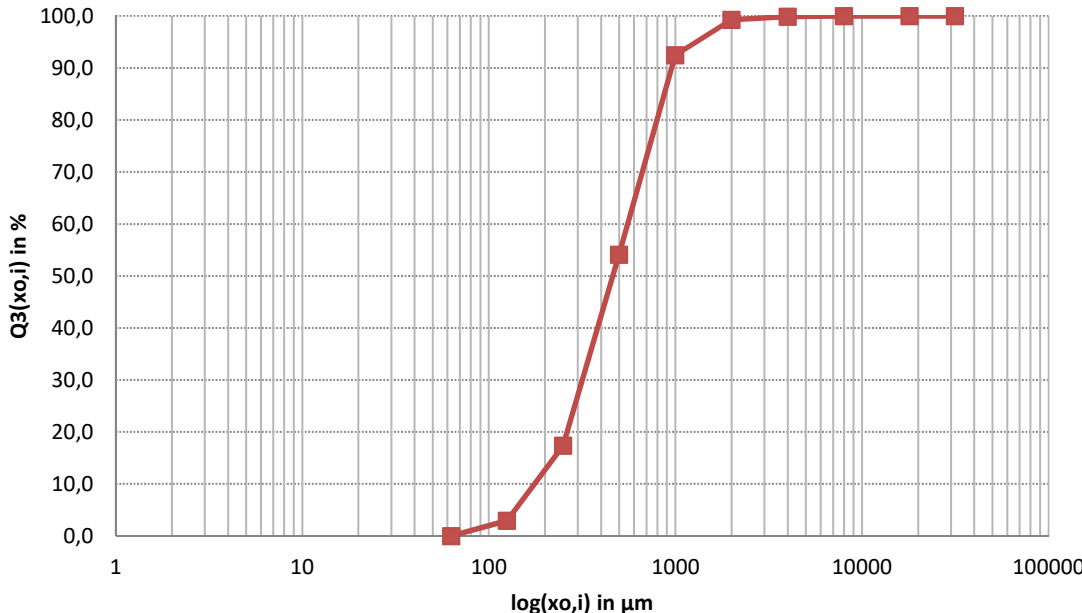
		<h3>Siebanalyse V1</h3> <p>Messprotokoll</p>		Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info	
Protokollnummer: 77_18_V1		Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG		Bearbeiter: Sperberg	
Datum: 10.09.2018		Probebezeichnung: Wachs			
		Bemerkungen:			
Mühle: HM_341		Mahlelement: 0 0			
Rotordrehzahl: 50		Sonstiges:			
Beanspruchungsgeschwindigkeit: nt_Versuchsparan					
Art des Siebgutes:		Siebsatz: R10			
Probenvorbereitung:		Probenteilung:			
Siebmethode: einzeln trocken im Satz nass		Siebmaschine: blau			
		Einstellparameter:			
Einwaage m_A: 99,5 g		Siebdauer: 5 min		Siebhilfen: Hand	

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößen- klassen (Nennweite) x_{ui} bis x_{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x_{oi} [µm]	Fraktion / Rückstand *) m_i [g]		Verteilungs- summe $Q_3(x_{oi})$ [%]
				$\Delta Q_{3,i} / R_i$ *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0,09	0,1	100,0
5	4 - 2	4000	0,6	0,6	99,9
6	2 - 1	2000	6,6	6,8	99,3
7	1 - 0,5	1000	37,13	38,4	92,5
8	0,5 - 0,25	500	35,52	36,7	54,1
9	0,25 - 0,125	250	13,98	14,5	17,4
10	0,125 - 0,063	125	2,82	2,9	2,9
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			96,74		

Masseverlust: $m_A - \Sigma(m_i) =$ 2,76 g entspricht 2,8 %


Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

<div></div>	<div>Siebanalyse V1</div> <div>Auswertung</div>	<div>Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info</div>
<div>Auftrag Nr.: 77_18_V1</div>	<div>Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG</div>	<div>Probebezeichnung: Wachs</div>
<div>Medianwert x_{50}: m. Partikelgröße x_m: Modalwert x_n: 5,50 mm 0,58 mm 0,29 mm</div>	<div>Sauter-Durchmesser x_{ST}: volumenspez. Oberfläche S_v: massespez. Oberfläche S_m:</div>	
<div><div>Histogramm Siebanalyse</div></div>	<div><div>Dichteverteilung Siebanalyse</div></div>	
<div><div>Summenverteilung Siebanalyse</div></div>		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle


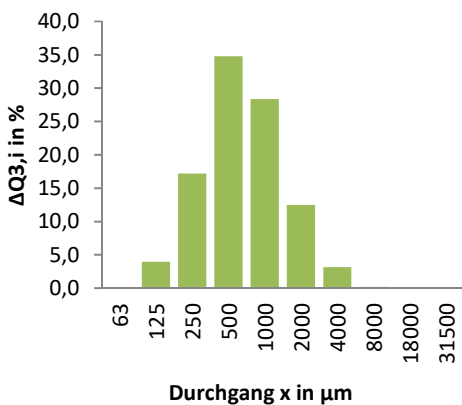
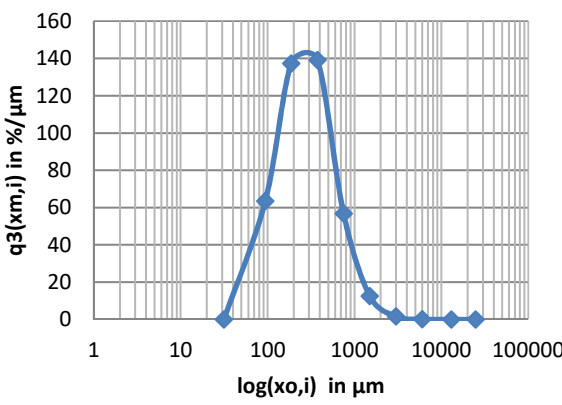
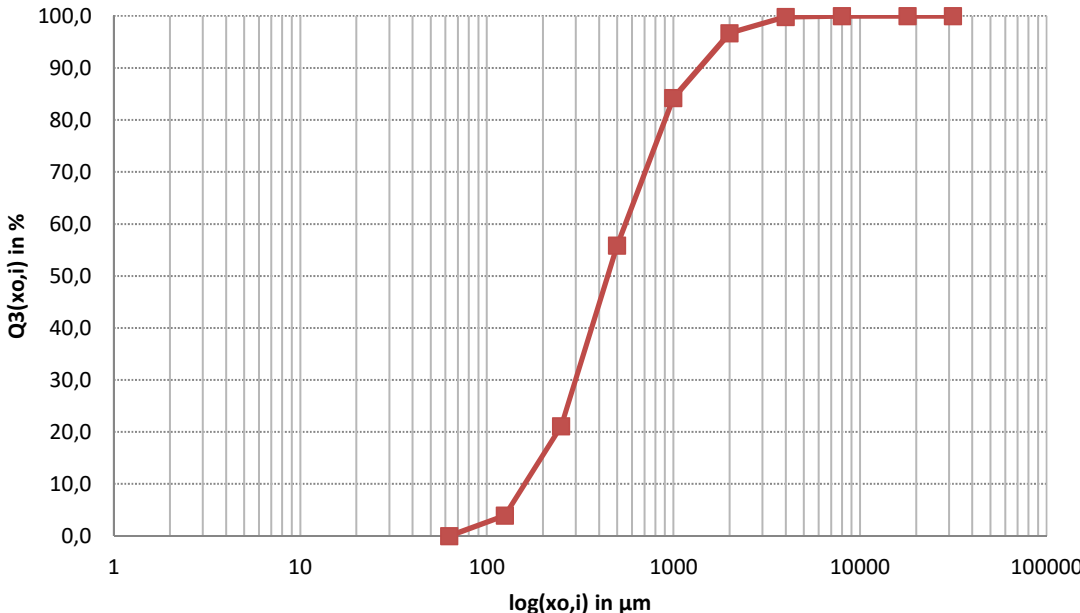
		<h3>Siebanalyse V3</h3> <p>Messprotokoll</p>		Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info	
Protokollnummer: 77_18_V3		Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG		Bearbeiter: Sperberg	
Datum: 10.09.2018		Probebezeichnung: Wachs			
		Bemerkungen:			
Mühle: HM_341		Mahlelement: 0 0			
Rotordrehzahl: 50		Sonstiges:			
Beanspruchungsgeschwindigkeit: 0					
Art des Siebgutes:		Siebsatz: R10			
Probenvorbereitung:		Probenteilung:			
Siebmethode: einzeln trocken im Satz nass		Siebmaschine: blau			
		Einstellparameter:			
Einwaage m_A: 101 g		Siebdauer: 5 min		Siebhilfen: Hand	

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößen- klassen (Nennweite) x_{ui} bis x_{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x_{oi} [μm]	Fraktion / Rückstand *) m_i [g]		Verteilungs- summe $Q_3(x_{oi})$ [%]
				$\Delta Q_{3,i} / R_i$ *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0,18	0,2	100,0
5	4 - 2	4000	2,89	3,1	99,8
6	2 - 1	2000	11,57	12,5	96,7
7	1 - 0,5	1000	26,31	28,3	84,2
8	0,5 - 0,25	500	32,28	34,8	55,9
9	0,25 - 0,125	250	15,93	17,2	21,1
10	0,125 - 0,063	125	3,65	3,9	3,9
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			92,81		

Masseverlust: $m_A - \sum(m_i) =$ 8,19 g entspricht 8,1 %


Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

<div></div>	<div>Siebanalyse V3</div> <div>Auswertung</div>	<div>Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info</div>
<div>Auftrag Nr.: 77_18_V3</div>	<div>Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG</div>	<div>Probebezeichnung: Wachs</div>
<div>Medianwert x_{50}: mm m. Partikelgröße x_m: 0,67 mm Modalwert x_n: 0,21 mm</div>	<div>Sauter-Durchmesser x_{ST}: volumenspez. Oberfläche S_v: massespez. Oberfläche S_m:</div>	
<div><div>Histogramm Siebanalyse</div><div></div></div>	<div><div>Dichteverteilung Siebanalyse</div><div></div></div>	
<div><div>Summenverteilung Siebanalyse</div><div></div></div>		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	<h3>Siebanalyse V4</h3> <p>Messprotokoll</p>	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
---	---	--


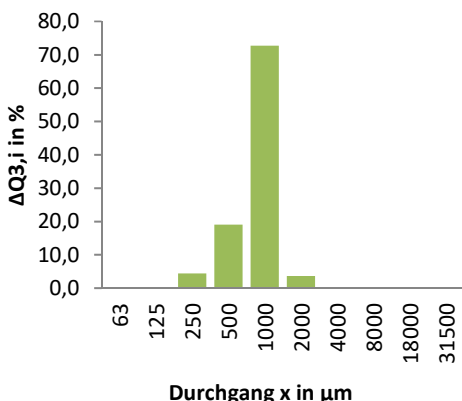
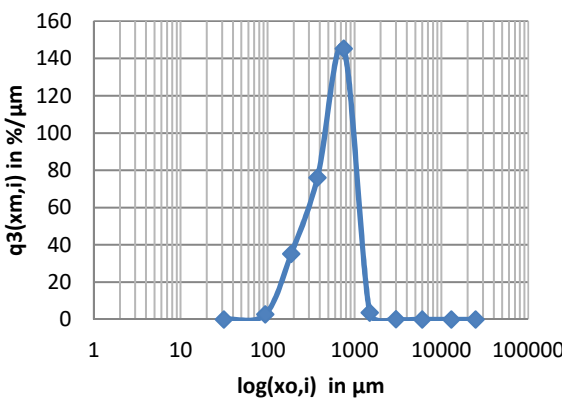
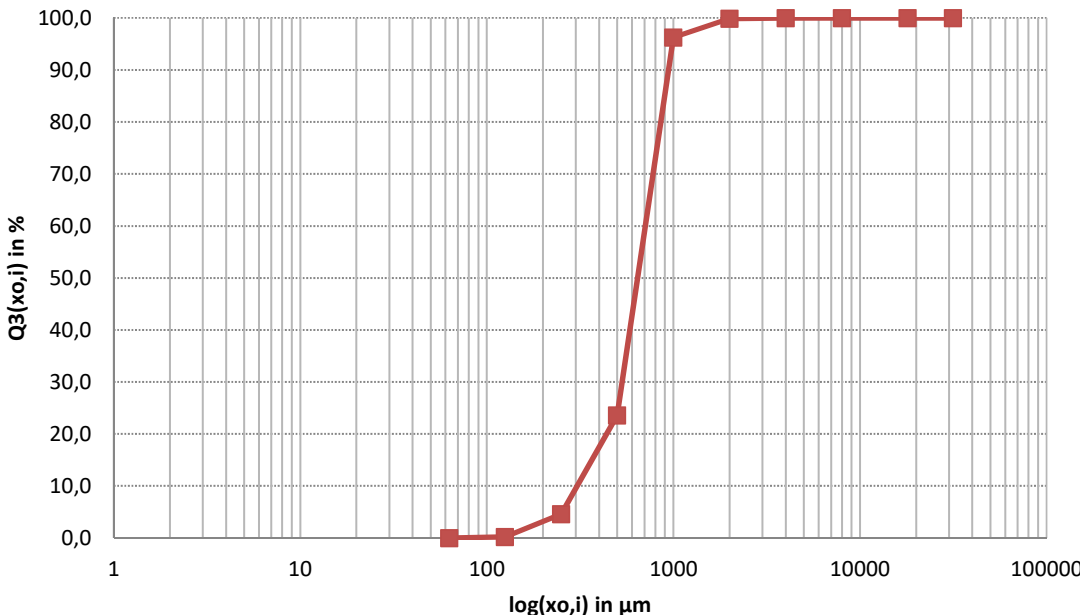
Protokollnummer: 77_18_V4	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Bearbeiter: Sperberg
Datum: 10.09.2018	Probebezeichnung: Wachs	
Bemerkungen:		
Mühle: HM_341	Mahlelement:	0 0
Rotordrehzahl: 50	Sonstiges:	
Beanspruchungsgeschwindigkeit: 0		
Art des Siebgutes:	Siebsatz: R10	
Probenvorbereitung:	Probenteilung:	
Siebmethode: einzeln trocken <u>im Satz</u> nass		Siebmaschine: blau
		Einstellparameter:
Einwaage m_A: 103 g	Siebdauer: 5 min	Siebhilfen: Hand

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößen- klassen (Nennweite) x _{ui} bis x _{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x _{oi} [µm]	Fraktion / Rückstand *) m _i [g]		Verteilungs- summe Q ₃ (x _{oi}) [%]
				ΔQ _{3,i} / R _i *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0	0,0	100,0
5	4 - 2	4000	0,13	0,1	100,0
6	2 - 1	2000	3,63	3,6	99,9
7	1 - 0,5	1000	73,03	72,7	96,3
8	0,5 - 0,25	500	19,11	19,0	23,6
9	0,25 - 0,125	250	4,42	4,4	4,6
10	0,125 - 0,063	125	0,17	0,2	0,2
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			100,49		

Masseverlust: m_A-Σ(m_i)= 2,51 g entspricht 2,4 %


Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

<div></div>	<div>Siebanalyse V4</div> <div>Auswertung</div>	<div>Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info</div>
<div>Auftrag Nr.: 77_18_V4</div>	<div>Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG</div>	<div>Probebezeichnung: Wachs</div>
<div>Medianwert x_{50}: mm</div> <div>m. Partikelgröße x_m: 0,68 mm</div> <div>Modalwert x_n: 0,55 mm</div>		<div>Sauter-Durchmesser x_{ST}:</div> <div>volumenspez. Oberfläche S_v:</div> <div>massespez. Oberfläche S_m:</div>
<div>Histogramm Siebanalyse</div> <div></div>		<div>Dichteverteilung Siebanalyse</div> <div></div>
<div>Summenverteilung Siebanalyse</div> <div></div>		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle


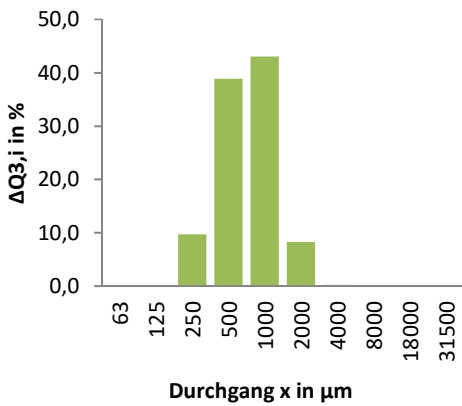
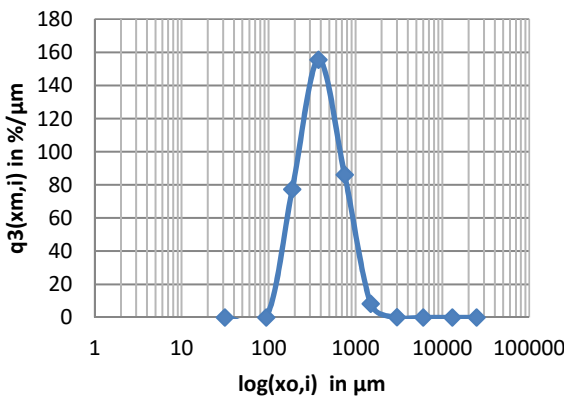
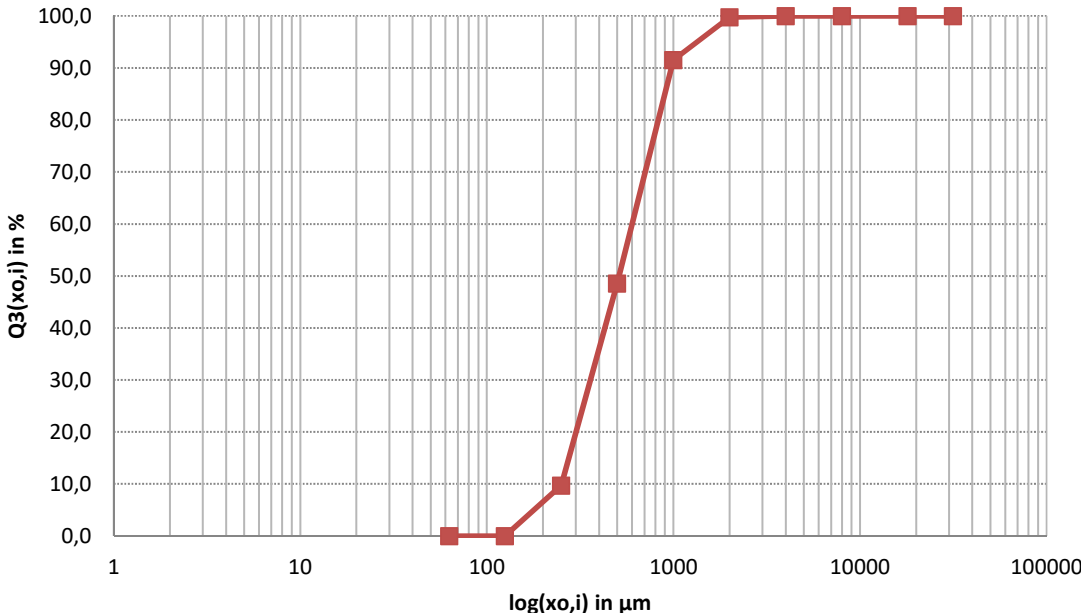
		Siebanalyse V5 Messprotokoll		Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info	
Protokollnummer: 77_18_V5		Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG		Bearbeiter: Sperberg	
Datum: 10.09.2018		Probebezeichnung: Wachs Bemerkungen:			
Mühle: Rekord_224		Mahlelement: F20006224 F20006281			
Rotordrehzahl: 38		Sonstiges:			
Beanspruchungsgeschwindigkeit: 76					
Art des Siebgutes:		Siebsatz: R10			
Probenvorbereitung:		Probenteilung:			
Siebmethode: einzeln trocken <u>im Satz</u> nass		Siebmaschine: blau			
		Einstellparameter:			
Einwaage m_A: 101 g		Siebdauer: 5 min		Siebhilfen: Hand	

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößen- klassen (Nennweite) x_{ui} bis x_{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x_{oi} [μm]	Fraktion / Rückstand *) m_i [g]		Verteilungs- summe $Q_3(x_{oi})$ [%]
				$\Delta Q_{3,i} / R_i$ *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0	0,0	100,0
5	4 - 2	4000	0,22	0,2	100,0
6	2 - 1	2000	8,16	8,2	99,8
7	1 - 0,5	1000	42,69	43,0	91,6
8	0,5 - 0,25	500	38,59	38,9	48,5
9	0,25 - 0,125	250	9,6	9,7	9,7
10	0,125 - 0,063	125	0	0,0	0,0
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			99,26		

Masseverlust: $m_A - \Sigma(m_i) =$ 1,74 g entspricht 1,7 %


Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

	<h3>Siebanalyse V5</h3> <p>Auswertung</p>	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
Auftrag Nr.: 77_18_V5	Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG	Probebezeichnung: Wachs
Medianwert x_{50} : mm m. Partikelgröße x_m : 0,62 mm Modalwert x_n : 0,32 mm		Sauter-Durchmesser x_{ST} : volumenspez. Oberfläche S_v : massespez. Oberfläche S_m :
<h4 style="text-align: center;">Histogramm Siebanalyse</h4> 		<h4 style="text-align: center;">Dichteverteilung Siebanalyse</h4> 
<h4 style="text-align: center;">Summenverteilung Siebanalyse</h4> 		

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle


		<h3>Siebanalyse V6</h3> <p>Messprotokoll</p>		Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info	
Protokollnummer: 77_18_V6		Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG		Bearbeiter: Sperberg	
Datum: 10.09.2018		Probebezeichnung: Wachs			
		Bemerkungen:			
Mühle: HM_341		Mahlelement: 0 0			
Rotordrehzahl: 50		Sonstiges:			
Beanspruchungsgeschwindigkeit: 0					
Art des Siebgutes:		Siebsatz: R10			
Probenvorbereitung:		Probenteilung:			
Siebmethode: einzeln trocken im Satz nass		Siebmaschine: blau			
		Einstellparameter:			
Einwaage m_A: 106 g		Siebdauer: 5 min		Siebhilfen: Hand	

1	2	3	4	5	6
i	Partikelgrößen- klassen (Nennweite) x_{ui} bis x_{oi} [mm]	Partikelgrösse Nennweite x_{oi} [µm]	Fraktion / Rückstand *) m_i [g]		Verteilungs- summe $Q_3(x_{oi})$ [%]
				$\Delta Q_{3,i} / R_i$ *) [%]	
1	>31,5	0	0	0,0	100,0
2	31,5 - 18	31500	0	0,0	100,0
3	18 - 8	18000	0	0,0	100,0
4	8 - 4	8000	0	0,0	100,0
5	4 - 2	4000	35,22	34,8	100,0
6	2 - 1	2000	56,66	55,9	65,2
7	1 - 0,5	1000	7,96	7,9	9,3
8	0,5 - 0,25	500	1,05	1,0	1,4
9	0,25 - 0,125	250	0,3	0,3	0,4
10	0,125 - 0,063	125	0,1	0,1	0,1
11	< 0,063	63	0	0,0	0,0
12					
Σ			101,29		

Masseverlust: $m_A - \Sigma(m_i) =$ 4,71 g entspricht 4,4 %

Anhang N - Mahlversuchsprotokolle zu Kapitel 4.6

Mahlversuchsprotokolle

<div></div>	<div>Siebanalyse V6</div> <div>Auswertung</div>	<div>Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info</div>
<div>Auftrag Nr.: 77_18_V6</div>	<div>Auftraggeber: BS-ENGINEERING / TU BRAUNSCHWEIG</div>	<div>Probebezeichnung: Wachs</div>
<div>Medianwert x_{50}: mm m. Partikelgröße x_m: 1,95 mm Modalwert x_n: 1,04 mm</div>	<div>Sauter-Durchmesser x_{ST}: volumenspez. Oberfläche S_v: massespez. Oberfläche S_m:</div>	
<div><div>Histogramm Siebanalyse</div></div>	<div><div>Dichteverteilung Siebanalyse</div></div>	
<div><div>Summenverteilung Siebanalyse</div></div>		